М. В. Лукінюк, В. Є. Лукін, С. А. Шворов, А. М. Гладкий,
Ю. О. Гунченко, П. С. Ємельянов

КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Рекомендовано Вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України як посібник для студентів вищих закладів освіти, що навчаються за напрямом підготовки 6.050202 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

Київ − 2016

УДК 681.2.08(075.8)
ББК 30.10я73
Л84

Рекомендовано вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України як посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти, що навчаються за напрямом підготовки 6.050202 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології". (Витяг з протоколу № 5 від 23 листопада 2016 р.)

Р е ц е н з е н т и:
-Юрченко О.М. доктор технічних наук, старший науковий співробітник (ІЕД НАН України)
-Коваль В.В. доктор технічних наук, професор (НУБіП України)
-Кузменко Б.В. доктор технічних наук, професор (ІВЕТ НАН України)

Л 84 Лукінюк М.В., Лукін В.Є., Шворов С.А., Гладкий А.М., Гунченко Ю.О., Ємельянов П.С.
Контрольно-вимірювальні прилади систем керування / Лукінюк М.В., Лукін В.Є., Шворов С.А., Гладкий А.М., Гунченко Ю.О., Ємельянов П.С. − К.: «Видавництво "Науковий світ"»®.2016. − 649с.

ISBN 978-966-675-719-2

У даному посібнику розглянуто структуру та принципи побудови систем автоматичного контролю, принципи дії, технічні та метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів і приладів та сучасних первинних вимірювальних перетворювачів, висвітлено методики вимірювання температури, тиску, рівня, кількості та витрати речовин, вологості газів та твердих і сипких матеріалів, параметрів руху твердих тіл. Розглянуто особливості використання цифрової та мікропроцесорної техніки в технологічних вимірюваннях.

Навчальний посібник призначено для студентів вищих навчальних закладів освіти, що навчаються за напрямом підготовки: 6.050202 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Може бути корисним для науково-педагогічних працівників ВНЗ I-IV рівнів акредитації за відповідними напрямками.

УДК 681.2.08(075.8)
ББК 30.10я73

ISBN 978-966-675-719-2

© Лукінюк М.В., Лукін В.Є., Шворов С.А., Гладкий А.М., Гунченко Ю.О., Ємельянов П.С. 2016

Список прийнятих скорочень і позначень

АСК – автоматизована система керування
АЦП – аналого–цифровий перетворювач
ВІС – вимірювальна інформаційна система
ВПҐ – вимірювач параметрів ґрунтів
ВЧ – висока частота, високочастотний
ВАХ – вольт-амперна характеристика
ДСП – Державна система приладів і засобів автоматизації
ДТП – диференціально–трансформаторний перетворювач
ДТС – диференціально–трансформаторна система
ЕОМ – електронна обчислювальна машина
ЕП – електронний підсилювач
ЕРС – електрорушійна сила
ЗВ – засіб вимірювання
ЗВТ – засіб вимірювальної техніки
ККД – коефіцієнт корисної дії
КЕОМ – керувальна електронна обчислювальна машина
ММП – магнітомодуляційний перетворювач
МП – мікропроцесор
МПП – магнітострикційний перетворювач переміщення
МПС – мікропроцесорна система
МТ – манометричний термометр
НВЧ – надвисокочастотний
НСХ – номінальна статична характеристика
ОЗб – обмотка збудження
ОК – обмотка керування
ОЯЕ – об’єкт ядерної енергетики
ПВП – первинний вимірювальний перетворювач
ПЗЗ – пристрій зворотного зв’язку
ПЧЕ – пружний чутливий елемент
РД – реверсивний двигун
РП – реостатний перетворювач
СД – синхронний двигун
СЕС – спектральна енергетична світність
СЕЯ – спектральна енергетична яскравість
ТКО – температурний коефіцієнт опору
ТО – термоперетворювач опору
ТП – термоелектричний перетворювач
ЦАП – цифро–аналоговий перетворювач
ЦВП – цифрові вимірювальні прилади
ЧЕ – чутливий елемент

ВСТУП

Історично розвиток вимірювальної техніки нерозривно пов'язаний з розвитком потреб суспільства. XXI століття характеризується прискореним розвитком науки та промислового виробництва, який немислимий без найширшого застосування найрізноманітніших вимірювань і засобів вимірювань. Без вимірювань не може обійтися жодна галузь діяльності людини. Основним споживачем вимірювальної техніки стала промисловість − тут вимірювальна техніка є невід'ємною частиною технологічних процесів, оскільки використовується для отримання інформації про чисельні режимні параметри, що визначають хід процесів. На використанні різноманітних і часто складних вимірювальних засобів (*контрольно-вимірювальних приладів*), комплексів і систем грунтується контроль якості продукції та сировини в промисловості.

Набір вимірюваних параметрів, використовуваних для вимірювань у системах керування, досить різноманітний для різних галузей промисловості й багато в чому залежить від специфіки технологічних процесів. Виробництва різних галузей промисловості залежно від характеру технологічного процесу можна поділити на дві групи: безперервні виробництва та виробництва з дискретним характером технологічних процесів. До першої групи належать виробництва таких галузей промисловості, як нафтопереробна, газопереробна, нафтохімічна, хімічна, металургійна, теплоенергетична й інші, до другої групи – машинобудування, приладобудування, радіоелектронна, харчова, сільськогосподарська тощо.

Вимірювання тиску, температури, витрати та рівня називають *теплотехнічними вимірюваннями*; вимірювання електричних величин – *електричними вимірюваннями.*

У виробництвах з безперервними технологічними процесами, над вхідними речовинами (сировиною) здійснюють безупинно в часі різні операції в апаратах, з'єднаних технологічними лініями. Ці операції спрямовані на зміну складу або стану вхідних речовин. У результаті проведення процесу одержують готові продукти заданої номенклатури і якості.

Сучасні виробництва різних галузей промисловості характеризуються складністю, великою потужністю технологічних апаратів і великою кількістю різних параметрів, від яких залежить перебіг технологічних процесів. Усе це зумовлює неможливість проведення сучасних технологічних процесів без їх часткової або повної автоматизації.

Автоматизація технологічного виробництва передбачає автоматичний контроль технологічних параметрів, автоматичне регулювання й автоматичне або автоматизоване керування, а також захист керованих процесів від аварійних ситуацій, сигналізацію про відхилення від номінальних режимів, захист навколишнього середовища.

Для автоматичного контролю, регулювання та керування необхідно мати певну інформацію про стан об'єкта автоматизації. Цю інформацію

одержують за допомогою відповідних вимірювань, які проводять *контрольно-вимірювальними приладами систем керування*. Автоматичний контроль найдавніший і водночас найважливіший вид автоматизації. По суті розвиток автоматизації почався зі створення та застосування в технологічних процесах систем автоматичного контролю.

Системи автоматичного контролю (у практиці технологічних вимірювань слово *контроль* традиційно вживають не у метрологічному розумінні (процедура для встановлення відповідності між станом об'єкта і нормою, результатом виконання якої є не отримання значення вимірюваної величини, як у вимірюваннях, а лише встановлення її співвідносності зі встановленою нормою: менша, більша за норму, чи дорівнює їй), а в значенні *вимірювання* зазвичай має у своєму складі щонайменше два засоби вимірювальної техніки, з'єднані між собою каналом зв'язку. Один із цих засобів вимірювальної техніки зазнає впливу вимірюваного параметра об'єкта автоматизації - його називають *первинним вимірювальним перетворювачем* (ПВП) (не вийшла з ужитку й «стара» назва - *датчик*). Він служить для перетворення фізичного параметра в інший параметр - сигнал (наприклад, електричний струм, тиск стисненого повітря), який зручно передавати каналами зв'язку. Другий засіб вимірювальної техніки, який називають вторинним приладом, вимірює сигнал, що надходить каналом зв'язку й містить інформацію про значення вимірюваного параметра, а відтак подає його у формі, зручній для сприймання людиною-оператором.

Спостерігаючи за показаннями вторинних приладів і знаючи встановлену норму для значень вимірюваних параметрів (значення граничнодопустимих відхилень іноді наносять безпосередньо на шкалу вторинного приладу), людина-оператор може здійснювати контроль, а за потреби – й ручне регулювання об'єкта автоматизації. У разі ручного регулювання оператор за допомогою відповідних пристроїв змінює подачу матеріального потоку або енергії на вхід об'єкта доти, доки значення вимірюваного параметра не досягне встановленої норми.

Застосування систем автоматичного контролю характерне для початкового етапу розвитку автоматизації, коли кількість технологічних апаратів і вимірюваних параметрів була невеликою. З розвитком технології нафтопереробної, нафтохімічної, хімічної, радіоелектронної харчової, сільськогосподарської й інших галузей промисловості кількість апаратів, використовуваних для проведення процесу, швидко збільшувалася. Ручне регулювання замінило автоматичне, здійснюване різними системами керування, – каскадними, комбінованими, адаптивними, програмними, автономними тощо. Робота цих систем ґрунтується на інформації, одержуваній від однієї або декількох систем автоматичного контролю.

Розвиток обчислювальної техніки уможливив автоматизацію керування через застосування електронних обчислювальних машин (ЕОМ) і мікропроцесорів (МП) безпосередньо в технологічних процесах. Значущість вимірювань ще більше зросла, коли в системах керування стали широко використовувати керувальні ЕОМ (КЕОМ) – попри свої величезні технічні

можливості, без повної інформації про стан об’єкта керування вони не здатні забезпечити ефективне керування цим об’єктом. (Надалі під цим терміном будемо розуміти технологічний процес і устаткування, в якому він відбувається). Це ознаменувало новий етап розвитку автоматизації, характерною ознакою якого для безперервних технологічних процесів став перехід до оптимального керування ними.

Використання КЕОМ дозволяє вирішувати загальне завдання керування технологічними процесами: у поточній ситуації на об’єкті керування, зумовленій вхідними параметрами та збурювальними впливами, знайти такі значення керувальних впливів з відомими обмеженнями, за яких задовольняється вибраний критерій оптимізації, а вихідні параметри не виходять за задані межі. Можливість виконання за допомогою КЕОМ цього завдання дозволяє повністю автоматизувати керування технологічними процесами й відмовитися від використання суб’єктивного досвіду керування ними людиною-оператором.

Отже, робота систем автоматичного контролю та керування будується на технологічних вимірюваннях датчиками. Цим визначається першорядна значущість вимірювань для систем автоматизації будь-якого рівня й складності, що, у свою чергу, потребує від студентів знань основ вимірювальної техніки й сучасних засобів автоматичного контролю режимних параметрів технологічних процесів, якості сировини, проміжних і кінцевих продуктів цих процесів, а також систем дистанційного передавання вимірювальної інформації.

Навчальний посібник написано на основі курсу «Контрольно-вимірювальні прилади систем керування», який викладається багато років на кафедрі автоматики та робототехничних систем ім. акад. І.І. Мартиненка Національного університету Біоресурсів та природокористування України.

РОЗДІЛ 1
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАННЯ, ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

1.1. Основні відомості про вимірювання

Метрологія використовує поняття, які вимагають точних і однозначних визначень. З часом відбувається уточнення понять і їх визначення закріплюються в стандартах, рекомендаціях після стандартизації і метрологічних інструкцій. Основні терміни і визначення сучасної метрології встановлені в рекомендаціях по метрології РМГ 29-99, введених в дію 1 січня 2001 р.

Вимірювання – це сукупність операцій, що забезпечують знаходження співвідношення вимірюваної величини з її одиницею вимірювання і набуття значення цієї величини. Вимірювання виконується за допомогою технічного засобу, що зберігає одиницю фізичної величини.

Вимірюванню підлягають тільки фізичні величини. Результатом вимірювань є отримане **значення вимірюваної величини,** тобто відображення фізичної величини у вигляді числового значення з позначенням її одиниці виміру.

Для отримання інформації про **розмір** величини, тобто про кількісний уміст певної фізичної величини в об’єкті вимірювання, потрібен обмін енергією між об’єктом вимірювання і технічним засобом, за допомогою якого здійснюють вимірювання. Надзвичайно важливо, щоб у процесі вимірювання втручання засобів вимірювання в досліджуване середовище не порушувало його властивостей, інакше отримана інформація буде недостовірною. На функціонуванні засобів вимірювання не повинні позначатися різні *впливові чинники* чи неінформативні параметри вхідних величин. Окрім того, під час вимірювання потрібно враховувати розподіл самої вимірюваної величини в просторі та часі, її зв’язок з характером досліджуваного процесу та з навколишнім середовищем. Вимірювання виконують за допомогою **засобів вимірювання** (ЗВ), тобто застосовуваних під час вимірювань технічних засобів з унормованими метрологічними характеристиками.

1.1.1. Фізичні величини. Одиниці величин

Фізична величина – це властивість загальна в якісному вираженні для багатьох фізичних об'єктів, але в кількісному вираженні індивідуальна для кожного з них.

Так, наприклад, «сила струму» як фізична величина в якісному вираженні є характеристикою різних електричних вимірів. Разом з тим кількісне значення сили струму, що протікає по ланцюгах кожного виробу, може бути різним.

Для встановлення розходження в кількісному вираженні даної властивості в аналізованих об'єктах (явищах, процесах) введене поняття розміру фізичної величини.

Розмір фізичної величини – це деяке кількісне вираження фізичної величини, властиве конкретному матеріальному об'єкту, системі, явищу або процесу. Справжній розмір фізичної величини існує об'єктивно, незалежно від того знаємо ми його чи ні (наприклад, опір конкретного провідника або струм у конкретному електричному колі). Разом з тим на практиці поняття «розмір» для кількісного оцінювання змісту фізичної величини не використовується, так як не містить прямої кількісної оцінки. Для цього застосовують поняття «значення фізичної величини». Значення *фізичної величини* – це кількісна оцінка розміру фізичної величини, подана у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць (наприклад, значення опору провідника 5 Ом або значення сили струму 8 А).

Розрізняють істинне значення фізичної величини, яке ідеально відображає властивість об'єкта, і дійсне, знайдене експериментально, досить близьке до істинного значення, яке можна використовувати замість нього, і також виміряне значення, зняте із вимірювального приладу.

Сукупність величин, зв'язаних між собою залежностями, утворюють систему фізичних величин, у якій є основні й похідні величини.

Основна фізична величина – це величина, що входить у систему фізичних величин й умовно прийнята як незалежна від інших величин цієї системи.

Похідна фізична величина – це величина, що входить у систему фізичних величин й визначається через основні величини цієї системи. Важливою характеристикою фізичної величини є її розмірність (dim).

Розмірність – це вираз у формі одночлена, піднесеного у степінь, складеного з добутків символів основних фізичних величин, що відображає зв'язок даної фізичної величини з фізичними величинами, прийнятими в даній системі величин за основні, з коефіцієнтом пропорційності, рівним одиниці. Розмірність основної величини щодо самої себе дорівнює одиниці, тобто формула розмірності основної величини збігається з її символом. Наприклад розмірність довжини $\dim l = L$; розмірність маси $\dim m = M$; розмірність часу $\dim t = T$.

Показник розмірності фізичної величини – це показник ступеня, у який піднесена розмірність основної фізичної величини, що входить у розмірність похідної фізичної величини.

Кожній основній фізичній величині відповідає своя розмірність, яка позначається однією літерою (символом), наприклад: L – довжина, M – маса, T – час, I – сила струму, Θ – термодинамічна температура, N – кількість речовини, J – сила світла.

За міжнародним стандартом ISO 31/0-74, розмірність похідної величини X в загальному вигляді визначається як добуток розмірностей основних величин, піднесених до відповідних степенів :

$$\dim X = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\varepsilon} N^{\xi} J^{\eta}, \qquad (1.1)$$

де dim – знак розмірності (скорочення англійського слова dimension – розмірність);

α, β, γ, δ, ε, ξ, η – показники степенів цілі (від'ємні або додатні) числа. Коефіцієнти пропорційності у виразі (1.1) завжди приймаються рівними одиниці.

Дуже часто найменування одиниці фізичної величини помилково називають її розмірністю.

Наприклад, у виразі 100 м/с поряд з числом вказано найменування одиниці фізичної величини – " швидкості ".

Розмірність " швидкості " визначається так :

$$\dim \mathrm{v} = \dim s/t = L\,T^{-1}$$

За допомогою розмірності легко перевірити правильність написання формул, що зв'язують різні фізичні величини.

Наприклад, треба перевірити справедливість виразів

$$s = \mathrm{v}\,t \tag{1.2}$$

$$s = \mathrm{v}^2/g\,, \tag{1.3}$$

де g – прискорення вільного падіння.

$$\dim \mathrm{s} = \dim \mathrm{v\,t} = \frac{L}{T}T = L.$$

$$\dim \mathrm{s} = \dim \mathrm{v}^2/\mathrm{g} = \frac{L^2}{T^2}\frac{T^2}{L} = L$$

Розмірності співпали, тобто вирази (1.2) і (1.3) справедливі.

Контроль розмірності базується на такому правилі : рівняння записано правильно, якщо розмірності його правої і лівої частини однакові.

Більшість фізичних величин є розмірними, тобто такими, у розмінностях яких хоча б одна з основних величин зведена в ступінь із показником, не рівним нулю.

Величина називається безрозмірною, якщо в її розмірність входять основні величини в ступені з показником, рівним нулю. Безрозмірні (відносні) величини являють собою відношення даної фізичної величини до однойменної, яка застосовується як вихідна (наприклад, коефіцієнт трансформації).

Фізичні величини залежно від розмірів, які вони можуть мати при зміні в обмеженому діапазоні, підрозділяють на безперервні (аналогові) і квантовані (дискретні). Аналогова величина може мати в заданому діапазоні безліч розмірів. Квантована величина має в заданому діапазоні тільки певне число розмірів. Фізичні величини можуть бути постійними або змінними в часі. При вимірі постійної в часі величини досить визначити одне її миттєве значення. Змінні в часі величини можуть мати квазідетермінований або випадковий характер змін.

Квазідетермінована фізична величина – це величина, для якої відомий вид залежності від часу, але не відомий вимірюваний параметр цієї залежності. Випадкова фізична величина – величина, розмір якої змінюється в часі випадковим чином. Фізичні величини ділять на активні й пасивні. Активні величини (наприклад, ЕРС джерела електричного струму) здатні без

допоміжних джерел енергії створювати сигнали вимірюваної інформації. Пасивні величини (наприклад, електричний опір) самі не можуть створювати сигнали вимірюваної інформації Для цього їх потрібно активізувати за допомогою допоміжних джерел енергії.

Числові значення вимірюваних фізичних величин залежать від використовуваних одиниць вимірів цих величин. **Одиниця фізичної величини** – це конкретна фізична величина, певна й прийнята за домовленістю, з якою порівнюються інші величини.

Щоб уникнути випадкових величин в результатах вимірів, тобто забезпечити єдність вимірів, одиниці фізичних величин установлюють за певними правилами й закріплюють. Історично склалося так, що одиниці фізичних величин поєднуються в системи. **Система одиниць фізичних величин** – це сукупність основних і похідних одиниць, що поширюються на деяку систему величин, утворена відповідно із прийнятими принципами. В Україні у встановленому порядку допускаються до застосування одиниці величин Міжнародної системи одиниць (СІ), прийнятих Генеральною конференцією із мір і ваг та рекомендованих Міжнародною організацією законодавчої метрології.

Розрізняють основні, похідні, кратні, дольні, когерентні, системні та позасистемні одиниці.

Основна одиниця системи – це одиниця основної фізичної величини, обрана при укладенні системи одиниць.

Метр – довжина шляху, що проходить світло у вакуумі за інтервал часу 1/299792458 частину секунди.

Кілограм – одиниця маси, рівна масі міжнародного прототипу кілограма.

Секунда – час, що дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома Цезію-133.

Ампер – сила незмінного струму, що при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини й мізерно малої площі кругового поперечного перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від іншого, викликав би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Кельвін – одиниця термодинамічної температури, рівна 1/273,16 частини термодинамічної температури, потрійної краплі роси.

Моль – кількість речовини системи, що містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці – 12 масою 0,012 кг.

Кандела – сила світла в заданому напрямку джерела, яка здійснює монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямку складає 1/683 Вт/ср.

Передбачені також дві додаткові одиниці.

Радіан – кут між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

Стерадіан – кут з вершиною в центрі сфери, який вирізає на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата із стороною, рівною радіусу сфери.

Основні й додаткові одиниці СІ забезпечують універсальність цієї системи, тому що вони є одиницями фізичних величин, що відображають основні властивості матеріального світу, і дають можливість утворювати похідні одиниці для будь-яких фізичних величин у всіх галузях науки й техніки.

Похідна одиниця системи – одиниця похідної фізичної величини системи, утворена за рівнянням, що зв'язує її з основними одиницями або ж з основними й вже визначеними похідними.

Наприклад, одиниця потужності, виражена через одиниці СІ.

$1\,\text{Вт} = \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$. Основні й деякі похідні одиниці СІ, що використовуються в електротехніці, наведені в додатку 4.

Поряд з одиницями СІ прийнято виділяти декілька видів позасистемних одиниць:

− одиниці, що допускаються нарівні з одиницями СІ (хвилина, година, доба, літр та ін.);

− одиниці, що застосовуються в спеціальних галузях науки й техніки (світловий рік, парсек, діоптрія, електрон-вольт і ін.);

− одиниці, вилучені зі вживання (міліметр ртутного стовпчика, кінська сила та ін.).

До числа позасистемних відносять також кратні й дольні одиниці виміру, що мають іноді власні найменування, наприклад, одиниця маси – тонна (т). У загальному випадку десяткові, кратні й дольні одиниці утворюються за допомогою множників і приставок.

1.1.2. Види та методи вимірювань

У метрології вимірювання визначається як сукупність операцій, виконуваних за допомогою технічного засобу, який зберігає одиницю фізичної величини і дозволяє порівняти вимірювану величину з її одиницею й одержувати значення цієї величини.

Процесу знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом із використанням спеціальних технічних засобів відповідає рівняння метрології, що зв'язує значення вимірюваної величини A із значенням цієї величини, прийнятим за одиницю виміру $[A]$

$$A = n \times [A], \qquad (1.4)$$

де n – числове значення фізичної величини.

Вимірювання як експериментальні процедури визначення значень вимірюваних величин досить різноманітні.

Сукупність вимірювань фізичних величин, що властиві якій-небудь галузі науки або техніки і мають свою специфіку, називають областю вимірювання.

Прийнято розрізняти наступні основні області вимірювання: вимірювання геометричних величин; вимірювання механічних величин; вимірювання параметрів потоку, витрат, рівня, об'єму речовин; фізико-хімічні вимірювання; вимірювання часу й частоти; вимірювання електричних і магнітних величин на постійному й змінному струмі; вимірювання акустичних величин та ін.

Класифікація видів вимірювання щодо основних класифікаційних ознак представлена в табл.1.1. Дамо коротку характеристику деяким видам вимірювання.

За способом отримання значень вимірюваної величини вимірювання поділяють на прямі та непрямі

Пряме вимірювання – вимірювання, при якому вихідне значення величини знаходять безпосередньо дослідним шляхом у результаті виконання вимірювання. Наприклад, вимірювання довжини лінійкою, температури термометром, амперметром сили струму тощо. Прямі вимірювання є основою складніших вимірювань – непрямих.

Непряме вимірювання – вимірювання, при якому шукане значення величини знаходять на підставі відомої залежності між цією величиною й величинами, які знаходяться прямим вимірюванням. Наприклад, вимірювання опору резистора за допомогою амперметра й вольтметра з використанням залежності, що зв'язує опір з напругою й струмом, швидкість можна обчислити за результатами вимірювань шляху та часу, густину – за результатами вимірювань маси й об'єму і т. ін.

Розрізняють також спільні й сукупні вимірювання, при яких за результатами прямих або непрямих вимірювань одних фізичних величин знаходять значення інших величин.

Спільні вимірювання – це проведені одночасно виміри двох або більше не однойменних величин для знаходження залежності між ними. Класичним прикладом спільних вимірів є знаходження залежності опору резистора від температури

$$R(t^0) = R_{20}\left[1 + A(t^0 - 20) + B\left(t^0 - 20\right)\right],$$

де R_{20} – опір резистора при $t = 20^0 C$; $A; B$ – температурні коефіцієнти.

Для одержання залежності $R(t^0)$ необхідно провести мінімум три виміри опору R при трьох різних температурах $R(t_1^0)$, $R(t_2^0)$, $R(t_3^0)$, скласти систему із трьох рівнянь і, розв'язавши її, визначити коефіцієнти R_{20}, $A; B$ у шуканій залежності.

Сукупні вимірювання – це проведені одночасно вимірювання декількох однойменних величин, при яких шукані значення величин знаходять при рішенні системи рівнянь, одержаних при прямих вимірах і різних сполученнях цих величин.

Таблиця 1.1

Види вимірювань

Класифікаційна ознака	Види вимірювання
За видом вимірювальної величини	Вимірювання електричного опору, електричної напруги, потужності електричного сигналу, напруженості електричного поля та ін.
За способом знаходження числового значення вимірювальної величини	Прямі, непрямі, спільні, сукупні
За способом вираження результатів вимірювання	Абсолютні, відносні
За характером залежності вимірюваної величини від частоти	Статичні, динамічні
За точністю вимірювання	Максимально можливої точності, технічні

Прикладом сукупних вимірювань може бути знаходження опорів двох резисторів за результатами вимірювання опорів послідовного й паралельного з'єднань цих резисторів. Шукані значення опорів знаходять із системи двох рівнянь.

Спільні й сукупні виміри за способами знаходження шуканих значень вимірюваних величин близькі між собою. Дійсно, і в одному, і в іншому випадку шукані значення знаходять шляхом розв’язання систем рівнянь. Відмінність полягає в тому, що при сукупних вимірах одночасно вимірюють декілька однойменних величин, а при спільних – різнойменних.

Абсолютні вимірювання – вимірювання, проведені при прямих вимірах однієї або декількох величин і використанні значень фізичних констант, наприклад, виміру сили струму в амперах.

Відносні вимірювання – вимірювання відношення значення фізичної величини до однойменної величини або зміни значення величини стосовно однойменної величини, прийнятої за вихідну.

До статичних вимірів належать виміри, при яких ЗВ працює в статичному режимі, тобто коли його вихідний сигнал (наприклад, відхилення покажчика) залишається незмінним протягом часу виміру.

До динамічних вимірів належать виміри, виконані ЗВ в динамічному режимі, тобто коли його показання залежать від динамічних властивостей. Динамічні властивості ЗВ виявляються в тому, що рівень змінного впливу на нього в який-небудь момент часу обумовлює вихідний сигнал ЗВ у наступний момент часу.

Виміри максимально можливої точності, що досягається при існуючому рівні розвитку науки й техніки. Такі виміри проводять при створенні еталонів і вимірах фізичних констант. Характерними для таких вимірів є оцінка погрішностей й аналіз причин їхнього виникнення. До цього

ж класу належать і деякі спеціальні вимірювання, що потребують високої точності.

Технічні виміри – це виміри, проведені в заданих умовах за певною методикою, розробленою й дослідженою заздалегідь; як правило, до них належать масові виміри, проведені у всіх галузях народного господарства, за винятком наукових досліджень. Прикладами таких вимірювань є технологічні вимірювання температури, тиску, витрати тощо. При технічних вимірах погрішність оцінюють за метрологічними характеристиками ЗВ з урахуванням застосовуваного методу виміру.

Контрольно – перевірочні виміри – це виміри, які виконуються службами метрологічного нагляду з метою визначення метрологічних характеристик ЗВ. До таких вимірів зараховують виміри при метрологічній атестації ЗВ, експертні виміри та ін.

Ці вимірювання виконують такими засобами і за такими методиками, які з обумовленою ймовірністю гарантують отримання похибки результату, що не перевищує певного наперед заданого значення.

Взаємодія ЗВ з об'єктом заснована на фізичних явищах, сукупність яких складає принцип вимірів. Сукупність прийомів використання принципу й засобів вимірів називається методом виміру.

Усі без винятку методи вимірів засновані на порівнянні вимірюваної величини з величиною, відтвореною мірою (однозначної або багатозначної). При цьому, в залежності від способу застосування міри відомої величини, виділяють метод безпосередньої оцінки й методи порівняння з мірою (рис. 1.1).

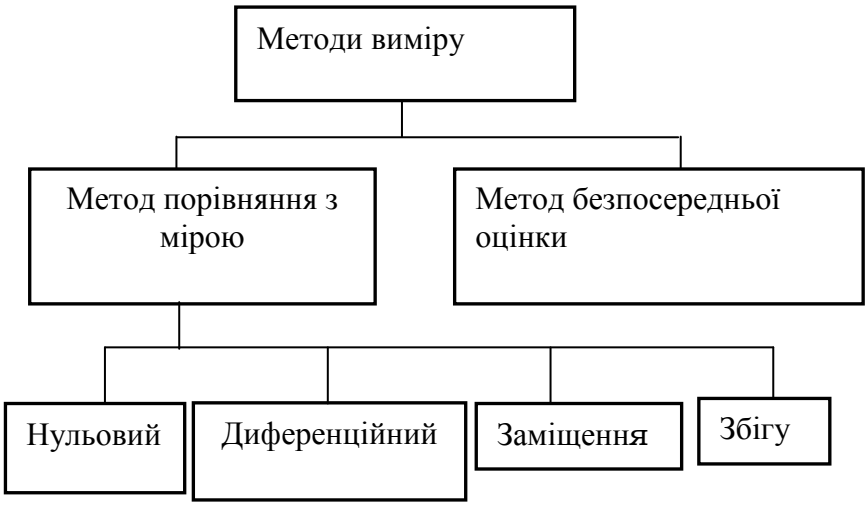


Рис.1.1. Класифікація методів виміру

Метод безпосередньої оцінки характеризується тим, що значення вимірюваної величини відраховують безпосередньо за відліковим пристроєм вимірювального приладу прямої дії. Шкала приладу заздалегідь градуюється за допомогою багатозначної міри в одиницях вимірюваної величини. Так вимір сили струму за допомогою амперметра є прикладом прямого виміру методом безпосередньої оцінки.

Методи порівняння з мірою припускають порівняння вимірюваної величини й величини, відтвореної мірою, при кожній процедурі вимірювання, тобто відмінною рисою методів порівняння є безпосередня участь у процесі вимірювання міри відомої величини, однорідної з вимірюваною. Найбільше поширені наступні методи порівняння: *диференційний, нульовий, заміщення, збігу*.

При **нульовому методі виміру** різниця вимірюваної величини й відомої величини зводиться в процесі виміру до нуля, що фіксується високочутливим нуль-індикатором. При високій точності мір, що відтворюють відому величину, і високої чутливості нуль-індикатора може бути досягнута висока точність виміру. Різновид цього методу – ***компенсаційний* метод *вимірювання***, який використовують у тих випадках, коли важливо виміряти фізичну величину, не порушуючи процесу, в якому її спостерігають (наприклад, у разі підключення вольтметра, який «забирає» на себе частину струму, що проходить в досліджуваній ділянці електричного кола). Із підключенням засобу вимірювання, що реалізує компенсаційний метод, до об'єкта вимірювання на засобі вимірювання формується дія, спрямована назустріч дії, зумовленій самим досліджуваним явищем (процесом). При цьому створюване в засобі вимірювання явище змінюється доти, доки не буде досягнуто повної компенсації впливу досліджуваного явища на засіб вимірювання. За значенням фізичної величини, яка створює компенсувальне явище, судять про значення вимірюваної фізичної величини. За цим принципом будують більшість промислових вимірювачів – автоматичні потенціометри, мости, інші прилади (у поширеній серії промислових вторинних приладів КС літера «К» якраз і означає «компенсаційний»).

При **диференціальному методі** за шкалою вимірювального приладу відраховують різницю вимірюваної величини й величини, відтворюваної мірою. Невідому величину визначають за відомою величиною й виміряною різницею. Таким чином на відміну від нульового методу при даному методі вимірювана величина врівноважується не повністю.

Метод заміщення передбачає почергове підключення на вхід індикатора вимірюваної й відомої величин, тобто вимір проводять у два прийоми. Найменша похибка виміру виходить у тому випадку, коли в результаті підбору відомої величини індикатор дає такий же відлік, що й при невідомій величині. Прикладом використання цього методу є вимір робочого загасання з використанням магазину загасань.

Метод збігу заснований на вимірі різниці між вимірюваною величиною й величиною, відтвореною мірою. При вимірюванні використовують збіги оцінок шкал або періодичних сигналів. Метод застосовується, наприклад, при вимірі частоти й часу за еталонними сигналами.

1.1.3. Поняття про шкали

Фізичні й нефізичні величини, що дозволяють описувати різні властивості об'єктів, явищ і процесів можуть вимірятися або оцінюватися.

Як ми вже відзначали, процес виміру припускає порівняння фізичної величини з її одиницею за допомогою спеціальних технічних засобів. Величини, для яких не можна ввести одиницю виміру, можуть оцінюватися. Оцінювання – це проведена за певними правилами процедура приписування даній величині певного знака (числа).

Для виміру й оцінювання властивостей різних об'єктів, явищ, процесів у метрології й кваліметрії використовують різні шкали (не слід ототожнювати з поняттям «шкала відлікового пристрою засобу вимірювання»).

Кількісні і якісні шкали в сучасній теорії виміру й оцінювання розглядають у вигляді картежа із трьох елементів $\langle X, , Y \rangle$, де $X = \{x_1, x_2, ...x_n, R_x\}$ – *емпірична система*, що включає безліч властивостей x_i, на яких відповідно до мети виміру задане деяке відношення $R_x; Y = \{ (x_1), ..., R_y \}$ – *знакова система*, що є відображенням емпіричної системи у вигляді деякої образної або числової системи, що відповідає вимірюваній емпіричній системі; $\varphi \in \Phi$ – неоднозначне відображення X на Y, яке встановлює відповідність між X і Y так, що $\{ (x_1), ... (x_2) \} \in R_y$ тільки тоді, коли $(x_1, ..., x_n) \in R_x$ [38].

В основі визначення (класифікації) типів шкал лежать припустимі перетворення $x_i \to y_i$.

Шкала найменувань (шкала номінального типу, класифікаційна шкала) – це тип шкали, значення якої використовують для виявлення розходжень між об'єктами або їх ідентифікації. Символи виду 1,2,3,...n, використовувані як шкальні значення, є не числами, а цифрами, призначеними для позначення об'єктів, тобто вони виконують ту ж функцію, що й найменування, і з ними не можна виконувати арифметичних дій.

У шкалах найменувань не можна ввести поняття одиниці виміру. У цих шкалах відсутній нульовий елемент; відсутні й поняття «більше» або «менше» нуля.

Шкала порядку (рангова шкала) – це тип шкали, відповідно до якої розміри вимірюваних величин розташовують у порядку зростання або убування.

Перетворення $\varphi(x)$ за шкалою порядку може бути монотонно зростаючим або убуваючим. Процедура розміщення розмірів у порядку їхнього зростання або убування з метою одержання вимірювальної інформації зі шкали порядку називається ранжируванням.

Шкала порядку використовується у випадках, коли потрібно впорядкувати об'єкти відповідно до якої-небудь якості, а також у часі або просторі, але при цьому не потрібно його точного виміру або коли яка-небудь якість у принципі вимірна, але в необхідний момент немає практичної або теоретичної можливості реалізувати цей вимір.

Для полегшення ранжирування за шкалою порядку деякі крапки на ній прийнято фіксувати як опорних (реперних). Реперні шкали порядку одержали поширення в гуманітарних науках, спорті, мистецтві й інших сферах.

Точкам реперної шкали можуть відповідати цифри, які називають балами, наприклад, 12-бальна міжнародна сейсмічна шкала; 10-бальна мінералогічна шкала твердості; чотирибальна шкала оцінювання знань (незадовільно, задовільно, добре, відмінно).

Шкала найменувань і шкала порядку – це якісні шкали. Так у реперній шкалі порядку, незважаючи на наявність опорних (реперних) крапок, інтервали між цими крапками залишаються невизначеними, тому з балами не можна проводити математичних дій. У шкалах порядку не можна ввести одиниці вимірів, тому що вони нелінійні й вид нелінійності не завжди відомий на окремих ділянках.

Шкала різниць (інтервалів) на відміну від розглянутих якісних шкал найменувань і порядку забезпечує підсумовування інтервалів (різниць) між різними кількісними проявами властивостей. На такій шкалі відкладається різниця значень величини, а самі значення залишаються невідомими. Шкала різниць складається з однакових інтервалів, має одиницю виміру й довільно обраний початок, тобто нульову оцінку.

Характерним прикладом шкали різниць є шкала інтервалів часу. Наприклад, інтервали роботи й інтервали відпочинку. Їх можна складати й віднімати, але безглуздо складати й віднімати дати яких-небудь подій.

Другий характерний приклад шкали різниць – це шкали температур. На шкалі Цельсія за початок відліку різниць температур взята температура танення льоду, і з нею порівнюють усі інші температури. Для зручності використання інтервал між температурою танення льоду й температурою кипіння води розбитий на 100 рівних інтервалів – градусів Цельсія. Градус Фаренгейта за розміром менший градуса Цельсія, тому що той же інтервал розбитий на 180 градусів. Крім того, початок відліку за Фаренгейтом зміщено на 32 градуси в бік низьких температур. Перехід від шкали Цельсія до шкали температур Фаренгейта відбувається за лінійним законом $\varphi(x) = ax + b$ тобто $1^0\ F = 1.81^0 C + 32$.

З наведеного прикладу видно, що при переході до еквівалентної шкали за допомогою лінійних перетворень у шкалі інтервалів відбувається зміна як початку відліку (b), так і масштабу вимірів (a).

У цілому шкала інтервалів описується рівнянням виду

$$A = A_0 + n[A],$$

де A_0 – початок відліку шкали; $[A]$ – одиниця розглянутої величини; n числове значення величини.

Шкалу відношення (подібності) прийнято розглядати як шкалу різниць із природним початком відліку. Так, наприклад, якщо за початок температурної шкали взяти абсолютний нуль, то за такою шкалою можна

відраховувати, у скільки разів температура одного об'єкта більше (менше) іншого.

Таким чином, шкала відношень описується рівнянням виду (1.4).

Перехід від однієї шкали відношення до іншої, еквівалентної шкали, здійснюється за допомогою перетворень подібності, тобто зміною масштабу вимірів.

Шкали відношення на відміну від шкал інтервалів відображають відношення властивостей об'єктів, тобто вони відображають, у скільки разів властивість одного об'єкта перевершує властивість іншого об'єкта.

Шкали відношення є досить удосконаленими, однак побудова шкали відношення можлива не завжди. Наприклад, час може вимірятися тільки за шкалою інтервалів.

При оцінюванні змінних показників якості за шкалою відношень, динаміка позитивних вимірювань, тобто підвищення якості в порівнянні з вихідним, відображається в значеннях більших одиниці, а при зниженні якості – менших одиниці.

Абсолютні шкали – це шкали, що мають усі ознаки шкал відношень і свою ознаку – однозначне визначення одиниці вимірів (істинний критерій установлення розміру одиниці). Абсолютні шкали використовують для вимірів відносних величин, таких як: коефіцієнт підсилення, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт амплітудної модуляції та ін.

Для шкал найменувань і порядку немає можливості ввести одиницю вимірів, тому їх прийнято називати умовними шкалами. Для шкал різниць, відношень й абсолютних є можливість введення одиниці вимірів, тому їх називають метричними (фізичними).

1.1.4. Похибки вимірювань і похибки засобів вимірювання

Наявність похибок об'єктивно визначається неможливістю в процесі вимірів ідеально відображати властивість досліджуваного об’єкта або процесу. Прийнято розрізняти похибку або точність результатів вимірів і похибку або точність ЗВ.

Похибкою результату виміру (похибкою виміру) називається відхилення результату від істинного значення вимірюваної величини, а похибка засобів вимірів – це різниця між показаннями ЗВ і істинним значенням вимірюваної величини.

Під точністю вимірів у загальному випадку розуміється якість вимірювань, що відображає близькість їх результатів до істинного значення вимірюваної величини, а точність засобів вимірів – це якість ЗВ, що відображає близькість до нуля його похибок.

Якість вимірів вважається тим вищою, чим ближче результат із вимірювання до істинного значення величини. Однак безпосередньо із результатів вимірів точність визначити не можна.

Звичайно про точність говорять у якісному вираженні, однак у деяких випадках точність визначається кількісно величиною, оберненої до модуля відносної погрішності:

$$\varepsilon = 1/|\delta| \qquad (1.5)$$

Похибка виміру (похибка результату виміру) може бути представлена як результат спільного впливу різного роду факторів об'єктивного й суб'єктивного характеру, що варто враховувати при проведенні класифікації похибок.

Класифікація похибок вимірів і похибок ЗВ за п'яти ознаками наведена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Похибки вимірювань і похибки засобів вимірювання

Вид похибок	Похибки вимірювань	Похибки ЗВ
За способом вираження		
Абсолютна Відносна Приведена	+ + -	+ + +
За характером виявлення		
Випадкова Систематична Груба	+ + +	+ + -
За джерелом виникнення		
Методична Інструментальна Суб’єктивна	+ + +	- - -
За умовами вимірювання		
Основна	-	+
Додаткова	-	+
По відношенню швидкодії ЗВ і швидкості вимірювання фізичної величини		
Статична	-	+
Динамічна	-	+

Дамо визначення й коротку характеристику похибок вимірів.

Абсолютна похибка виміру – це відхилення результату виміру від істинного значення вимірюваної величини:

$$\Delta = x_{\text{вим}} - x_{\text{іст}}, \qquad (1.6)$$

де $x_{\text{вим}}$ – значення величини, отримане в результаті її виміру; $x_{\text{іст}}$ – істинне значення величини. Істинне значення вимірюваної величини – таке її значення, яке ідеальним чином відбивало б у якісному й кількісному виглядах відповідну властивість об'єкта.

Оскільки істинне значення величини невідоме, то на практиці використовують поняття дійсного значення величини ($x_{\text{д}}$) (умовного істинного значення). Це значення величини, знайдене експериментальним

шляхом і настільки наближене до істинного значення, що для даної мети може бути використане замість нього.

З урахуванням зазначеної обставини:

$$\Delta = x_{\text{вим}} - x_{\text{д}}. \qquad (1.7)$$

Відносна похибка виміру – це відношення абсолютної похибки виміру до дійсного значення вимірюваної величини:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_{\text{д}}} \cdot 100\% \qquad (1.8)$$

Систематичною називається складова похибки вимірювання, що залишається постійної або закономірно змінюється при повторних вимірах однієї й тієї ж величини в тих самих умовах.

Постійна систематична похибка – це похибка, яка тривалий час зберігає своє значення, наприклад, протягом часу виконання вимірів похибки, що змінюються, можуть бути безперервно зростаючими, такими, що безупинно зменшуються, які змінюються періодично або за іншою, більш складною закономірністю.

Випадковою називається складова похибки виміру, з мінливим випадковим виявом (за знаком і значенням) при повторних вимірах однієї й тої ж величини, проведених при одних і тих же умовах.

Випадкові похибки, які виникають внаслідок одночасного впливу на результат виміру, важко піддаються аналізу причин, це: вплив зовнішніх електромагнітних полів, випадкові зміни самої вимірюваної величини, випадкові похибки використовуваних ЗВ й інші. У кожний момент часу зазначені причини, що впливають, проявляють себе по-різному, тому викликана ними похибка належить до розряду випадкових.

Випадкові похибки неминучі, і головною їх особливістю є непередбачуваність при проведенні чергового відліку. Тоді в основі процедури оцінювання випадкових похибок лежить теорія ймовірностей і математична статистика, де випадкова похибка $(\dot{\Delta})$ розглядається як випадкова величина, що приймає різні значення $(\dot{\Delta}_i)$

Грубою називається похибку, що істотно перевищує очікувану похибку у даних умовах виміру. Вона найчастіше є наслідком короткочасної зміни неврахованих зовнішніх змін, що діють живильний вимірювальний прилад напруги, механічного впливу на вимірювальну установку та ін. Грубі похибки за своєю природою випадкові. Вони звичайно виявляються при обробці результатів повторних вимірів значення вимірюваної величини й з подальшого розгляду виключаються.

Грубі похибки, що з'являються внаслідок неправильних дій оператора, називають також промахами. Причинами промахів можуть бути, наприклад, помилки при неправильному записі результату виміру, помилки внаслідок неправильного відліку за шкалою приладу та ін.

Методичною похибкою (похибкою методу вимірів) називається складова похибки виміру, що виникає від недосконалого методу вимірів. Причини виникнення цієї похибки можуть бути різними: недостатність вивчення об'єкта виміру; неможливість точного обліку впливу зовнішніх факторів; недосконаліть теорії фізичних явищ при дослідженні конкретної величини та ін. У результаті зазначених причин залежність між вимірюваною величиною й вихідним сигналом ЗВ відрізняються від реальних. Це й призводить до методичної похибки.

Методичні похибки не можна знайти шляхом аналізу характеристик використовуваного для вимірів вимірювального приладу. Вони визначаються лише шляхом створення математичних або імітаційних моделей об'єкта виміру.

Інструментальними називаються складові похибки вимірювання, що залежать від похибок, застосовуваних ЗВ. Інакше кажучи, інструментальна похибка виміру проявляється як сукупність похибок, обумовлених недосконалістю властивостей використовуваних ЗВ.

Розрізняють три складові інструментальні похибки: схемну, технологічну й експлуатаційну.

Схемна похибка (похибка схеми або конструкцій) – це інструментальна похибка, властива самій структурній або кінематичній схемі (конструкції) ЗВ. Ця похибка не пов'язана з недоліками виготовлення ЗВ.

Технологічна похибка − це інструментальна похибка, що виникає в результаті недосконалості технології виготовлення ЗВ. Наприклад, до технологічних зараховуємо похибки неточного нанесення відміток шкали (похибки градуювання).

Експлуатаційна похибка – це інструментальна похибка, що виникає в процесі експлуатації ЗВ (зношування, старіння, несправності).

Суб'єктивною називається похибка виміру, що є наслідком індивідуальних властивостей людини, обумовлених фізіологічними особливостями їх організму, швидкістю реакції або укоріненими неправильними навичками.

До суб'єктивної похибки слід зарахувати насамперед похибку відліку, що виникає від недостатньо точного відліку показань ЗВ. Однією із складових похибок відліку є похибка інтерполяції, що виникає від недостатньо точного оцінювання на око частки розподілу шкали, що відповідає положенню покажчика. Іншою складовою похибкою відліку є похибка паралакса, що відбувається внаслідок візирування стрілки, розташованої на деякій відстані від поверхні шкали, у напрямку, не перпендикулярному поверхні шкали.

Відзначимо, що похибка відліку усувається при використовуванні цифрових відлікових пристроїв, де похибка округляється й є інструментальною похибкою.

1.1.5. Місце вимірювань в системах керування

У системах керування вимірюванням характеристик об’єкта автоматизації здійснюється обов’язкова перевірка відповідності розробленої математичної моделі об’єкта самому фізичному об’єкту (ця процедура називається *ідентифікацією*).

Значущість вимірювань у технічному аспекті обумовлюється тим, що тільки вимірювання забезпечують одержання кількісної інформації про об’єкт керування або контролю, без котрих неможливі точне відтворення усіх заданих (регламентом) умов ведення технологічного процесу, високоефективне керування об’єктом і забезпечення високої якості виробів.

Місце вимірювання в керуванні можна показати на прикладі найбільш загальної схеми автоматичного керування, зображеної у вигляді сукупності чотирьох головних ланок, що взаємодіють по колу, тобто утворюють замкнену систему керування (рис. 1.2).

Отже, вимірювання реалізує зворотний зв'язок за якістю керування; для забезпечення високоточного керування ланка вимірювання 1 повинна мати високі метрологічні характеристики.

Вимірювання у цьому циклі відіграє роль містка, що з'єднує об'єкт керування 4 з головною ланкою керування 3, яка виробляє керуючу дію. Ланка вимірювання 1 подає інформацію про поточний стан об'єкта керування у вигляді певного сигналу $y_{зз}(t)$. Значення сигналу $y_{зз}(t)$, що характеризує поточний стан об'єкта керування, надходить у визначник стану об’єкта керування (обчислювальний пристрій) 2, який, порівнюючи поточні значення $y_{зз}(t)$ із заданими $g(t)$, формує сигнал керування $\varepsilon(t)$. Цей сигнал керування надходить на вхід пристрою 3, який за певним алгоритмом, формує керуючі впливи на об'єкт керування – керуючу дію $u(t)$ певної фізичної природи, покликану забезпечити задане значення інформаційного параметру $y(t)$ (керованого параметра) об'єкта керування.

В замкнених системах автоматичного керування керуюча дія формується на основі інформації про відхилення об'єкту керування від заданого стану $u(t) = A[\varepsilon(t)]$, тобто керуюча дія є функцією відхилення $\varepsilon(t)$ об'єкту керування від заданого стану.

В розімкнених системах автоматичного керування керуюча дія формується на основі інформації про збурення, що викликають відхилення об'єкту керування від заданого стану $u(t)= A[f(t)]$, тобто керуюча дія є функцією збурень $f(t)$.



Рис. 1.2. Спрощена структурна функціональна схема системи автоматичного керування

При комбінованому принципі керування керуюча дія формується на основі інформації про відхилення $\varepsilon(t)$ об'єкту керування від заданого стану і інформації про збурення$f(t)$, що спричиняють відхилення об'єкту керування від заданого стану, тобто керуюча дія формується згідно із законом $u(t) = A[\varepsilon(t), f(t)]$.

1.2. Засоби вимірювальної техніки

При виконанні вимірювань застосовуються не тільки вимірювальні прилади, а й інші технічні засоби, які об'єднуються загальною назвою – засоби вимірювальної техніки (ЗВТ).

Засіб вимірювальної техніки – технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики.

Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки – характеристики, які нормуються для визначення результату вимірювання та його похибок.

До засобів вимірювальної техніки відносяться **засоби вимірювань та вимірювальні пристрої.**

Засіб вимірювань – засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань.

Основною ознакою засобу вимірювань є те, що з його допомогою можна одержати результат вимірювання. До засобів вимірювань, таким чином, відносяться: **вимірювальні прилади, вимірювальні канали, вимірювальні системи, вимірювальні інформаційні системи.**

Вимірювальний прилад (ВП) – засіб для вимірів, призначений для здобуття вимірювальної інформації й перетворення її у форму, доступну для безпосереднього сприйняття спостерігачем (оператором). Сигнал вимірювальної інформації у вимірювальних приладах з'являється під впливом вимірюваної величини й функціонально пов'язаний із числовим значенням вимірюваної величини. Вимірювальні прилади, як правило, мають у своєму складі міру (міри).

Вимірювальні прилади можна класифікувати за рядом ознак.

За принципом дії розрізняють ВП аналогові й цифрові. Вимірювальний прилад, показання якого є безперервною функцією значень вимірюваної величини, називають аналоговим вимірювальним приладом, наприклад, електровимірювальний прилад з відліковим пристроєм у вигляді стрілки й шкали – аналоговий прилад. У цифровому приладі автоматично виробляються дискретні сигнали вимірювальної інформації, а показання подаються в цифровій формі.

За способом подання вимірювальної інформації вимірювальні прилади належать або до тих, що показують, або до тих, що реєструють. Прилади, які показують, допускають тільки відлічування показань, а ті, які реєструють, передбачають реєстрацію показань. Реєстрація може проводитися за допомогою самописів, пристроїв автоматичної цифрової печатки, пам'яті ЕОМ та ін. Часто функції показання й реєстрації об’єднують в одному приладі. Іноді знаходять застосування так звані регулюючі ВП, тобто прилади, що мають пристосування для керування технологічним процесом.

Залежно від способу перетворення сигналу вимірюваної інформації розрізняють прилади прямого перетворення (прямої дії) і прилади, що врівноважують перетворення (порівняння). У приладах прямого перетворення сигнал вимірюваної інформації змінюється необхідну кількість разів в одному напрямку без застосування зворотного зв'язку. У приладах перетворення, що врівноважують, поряд із ланцюгом прямого перетворення є ланцюг зворотного перетворення сигналу й вимірювана величина порівнюється з відомою величиною, однорідної з вимірюваною.

Залежно від ступеня усереднення вимірюваної величини розрізняють прилади, що дають показання миттєвих значень вимірюваної величини, і прилади інтегруючі, показання яких визначаються інтегралом за часом від вимірюваної величини.

За способом зняття показань розрізняють прилади прямопоказуючі й непрямопоказуючі. Більшість сучасних вимірювальних приладів є прямопоказуючими.

Вимірювальний канал – сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів зв’язку та інших технічних засобів, призначена для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану фізичну величину.

Вимірювальна система – сукупність функціонально об'єднаних мір, вимірювальних перетворювачів, ЕОМ й інших технічних засобів, розміщених у різних точках контрольованого об'єкта з метою виміру однієї або декількох фізичних величин, характерних цього об'єкта, і вироблення вимірювальних сигналів для різних цілей.

Зараз вимірювальні системи створюють, як правило, автоматизованими й називають автоматизованими вимірювальними системами (АВС), інформаційно-вимірювальними системами (ІВС), вимірювально-обчислювальними комплексами (ВОК).

Якщо в АВС ряд параметрів виміряється за принципом «придатний – не придатний», то такі системи називають автоматизованими системами контролю (АСК).

Вимірювальна інформаційна система – сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів контролю, діагностування та інших технічних засобів, об’єднаних для створення сигналів вимірювальної та інших видів інформації.

Вимірювальний пристрій – засіб вимірювальної техніки, в якому виконується лише одна зі складових частин процедури вимірювань (вимірювальна операція).

До вимірювальних пристроїв відносяться: міра, компаратор, вимірювальний перетворювач, масштабний перетворювач, обчислювальний компонент.

Міра – засіб вимірювання, призначений для відтворення й (або) зберігання фізичної величини одного або декількох розмірів з необхідною точністю. Міра може бути у вигляді тіла або пристрою. Наприклад, мірою маси є гиря, а мірою опору – зразковий вимірювальний резистор. Міри можуть бути однозначними, тобто відтворювати певний номінал за даною фізичною величиною (наприклад, конденсатор постійної ємкості) або багатозначними, тобто відтворюючий ряд однойменних величин різного розміру (наприклад, конденсатор змінної ємкості). Широке розповсюдження отримали спеціально підібрані набори мір, застосовувані не тільки окремо, але й у різних сполученнях з метою відтворення ряду однойменних фізичних величин різного розміру (наприклад, набір вимірювальних конденсаторів або резисторів). Якщо набір мір конструктивно об'єднаний у єдиний пристрій, що має пристосування для їхнього з'єднання в різних комбінаціях, його називають магазином мір (наприклад, магазин опорів, магазин загасань).

Компаратор – вимірювальний пристрій, що реалізує порівняння однорідних фізичних величин.

Вимірювальний перетворювач – засіб вимірювання, призначений для перетворення вимірюваної величини в іншу величину або вимірювальний сигнал, зручний для обробки, зберігання, подальших перетворень, індикації або передачі.

Вимірювальні перетворювачі мають нормовані метрологічні характеристики й конструктивно виконані, як правило, у вигляді самостійного ЗВ або є вбудованою складовою частиною вимірювального приладу. З метою спряження із ЗВ й використання у вимірювальних системах до вимірювальних перетворювачів звичайно ставлять суворі вимоги щодо уніфікації й стандартизації.

Залежно від місця у вимірювальному ланцюзі розрізняють *перетворювачі первинні й проміжні.* Первинні перетворювачі – це ті, до яких підводиться вимірювальна величина. Якщо первинні перетворювачі розміщаються безпосередньо на об'єкті дослідження, вилученому із місця обробки, то їх іноді називають датчиками.

Залежно від виду вхідного сигналу перетворювачі поділяють на аналогові, аналого-цифрові й цифро-аналогові. В аналогових вимірювальних перетворювачах на вході й на виході – аналогові сигнали. В аналого-цифрових вимірювальних перетворювачах на вході – аналоговий сигнал, а на виході – цифровий. У цифро-аналогових, навпаки, на вході – цифровий, а на виході – аналоговий сигнал. Широко поширені масштабні вимірювальні перетворювачі, призначені для зміни розміру величини в задане число раз.

Масштабний перетворювач – вимірювальний перетворювач, який реалізує масштабне вимірювальне перетворення.

Обчислювальний компонент – вимірювальний пристрій, що є сукупністю засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення і виконує обчислювальні операції під час вимірювання. Обчислювальний компонент – це числовий вимірювальний перетворювач, складова частина цифрових вимірювальних приладів.

1.2.1. Структурні схеми та загальні елементи засобів вимірювальної техніки

Принципи структурної побудови функціональних схем ЗВТ однозначно залежить від реалізованих у них методів перетворення, зокрема методів прямого та зрівноваженого перетворень.

Вимірювальний прилад, що реалізує метод ***прямого перетворення,*** за якого сигнал вимірювальної інформації рухається весь час в одному напрямі – від входу до виходу, можна подати функціональною структурною схемою (рис. 1.3).

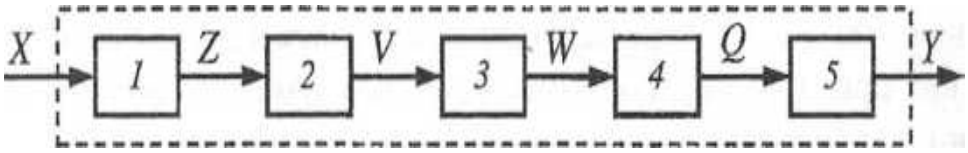


Рис. 1.3. Структурна схема вимірювального приладу прямого перетворення:

1 – первинний вимірювальний перетворювач; 2 – проміжний вимірювальний перетворювач; 3 – проміжний (передатний) перетворювач; 4 – вимірювальний механізм; 5 – показувальний (відліковий) пристрій

Структурні елементи цієї схеми, на кожному з яких відбувається певне перетворення вимірювальної інформації, називаються **вимірювальними перетворювачами** (іноді – *перетворюючими елементами*), а сукупність сполучених між собою вимірювальних перетворювачів, розміщених між вхідним *x* і вихідним *y* сигналами, – *вимірювальним колом*. Назви елементів структурної схеми залежать від виконуваних функцій та місця, де вони розміщені у вимірювальному колі.

Вимірювальний перетворювач 1, який першим взаємодіє з об’єктом вимірювання, називають **первинним вимірювальним перетворювачем.** Перший елемент ПВП – чутливий перетворювальний елемент, який безпосе-

редньо сприймає вхідну фізичну величину, зазвичай називають просто чутливим елементом (ЧЕ). У найпростішому ПВП може бути один ЧЕ. В такому випадку ПВП може складатися тільки з ЧЕ та додаткових елементів, потрібних для його закріплення на об'єкті, електричного з'єднання з іншими технічними пристроями автоматичної системи, захисту від дії небезпечних зовнішніх чинників тощо.

До складу ПВП можуть входити кілька перетворювальних елементів, а також інші, супутні їм допоміжні елементи (електричні, електромеханічні, механічні), які забезпечують виконання ПВП його функцій призначення, зокрема, його взаємодію з об'єктом та іншими технічними пристроями (наприклад, з вимірювальним приладом, циклом або системою, регулятором, ЕОМ тощо).

Вихідний сигнал ПВП має бути зручним для використання, а саме: для передачі на відстань, запам'ятовування, обробки, подальших перетворень, вимірювання, контролю, керування іншими технічними пристроями через діяння на них тощо. Натомість, ЧЕ часто перетворюють фізичну величину у вихідний параметр, який не може бути використаним для названих операцій (наприклад, у різноманітних ПЧЕ – це лінійне чи кутове переміщення або зусилля, щодо яких вживання терміну „ сигнал ” навряд є доречним).

Наступний за ПВП перетворювач (їх може бути кілька, або не бути зовсім; на наведеній схемі – перетворювач 2) називається **проміжним перетвовачем.** До проміжних належать і *передавальні перетворювачі*, призначені забезпечувати передачу сигналів на відстань (на схемі – перетворювач 3). *Вимірювальний механізм* 4 – це частина елементів конструкції аналогового вимірювального приладу, взаємодія яких зумовлює потрібне переміщення покажчика. **Показувальний (відліковий) пристрій** 5 – це сукупність елементів вимірювального приладу, яка подає візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Прикладом побудови вимірювального перетворювача прямого перетворення може бути трансформаторний перетворювач, принципову схему якого наведено на рис. 1.4.

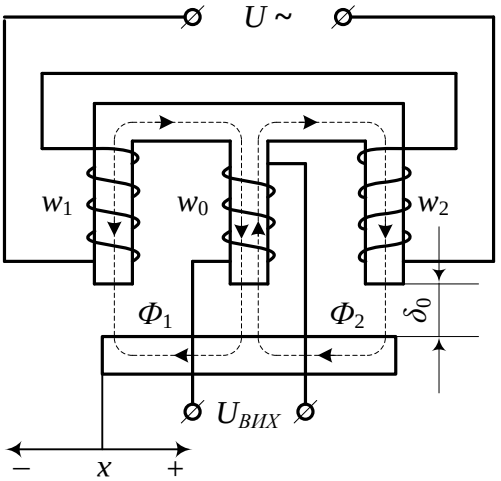


Рис. 1.4. Принципова схема трансформаторного перетворювача

У трансформаторному перетворювачі, зображеному на рис. 1.4, переміщення якоря на величину $\pm\Delta x$ зумовлює зміну магнітного опору і взаємної індуктивності M_{12} обмоток w_1 та w_2 ($M_{12} = w_1 w_2 / Z_M = f(x)$), а отже, й амплітуди змінної напруги на виході.

Обмотки кола живлення w_1 і w_2 однакові і включені таким чином, що, коли по ним протікає робочий струм, створювані ними магнітні потоки Φ_1 і Φ_2 спрямовані зустрічно в центральному стрижні, на якому розташована вихідна обмотка w_0. В цьому випадку вихідна напруга

$$U_{ВИХ} = 4{,}44f(\Phi_1 - \Phi_2), \qquad (1.9)$$

де f – частота живлячої напруги.

Аналогові засоби вимірювання забезпечують формування аналогових показань, цифрові засоби вимірювання (ЦЗВ) – цифрових. Частину показувального пристрою, положення якого відносно поділок шкали визначає показання аналогового вимірювального приладу, називають ***покажчиком.*** Покажчик може бути виконано у вигляді рухомих відносно шкали стрілки, променя світла, пера самописця, поверхні рідини (ртутний термометр, двотрубний дифманометр і т. ін.). А сукупність елементів засобу вимірювання, що реєструє (на носії) сигнал вимірювальної інформації, називають ***реєструвальним пристроєм***. Як і показувальні пристрої, реєструвальні також поділяють на аналогові (перо самописця залишає слід на діаграмному папері) та цифрові (інформація виводиться на принтер).

Структурну схему вимірювального приладу зрівноважувального перетворення можна подати у вигляді, зображеному на рис. 1.5.

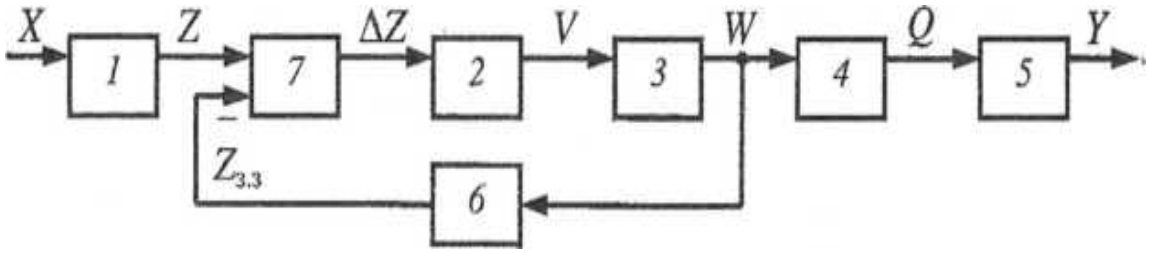


Рис. 1.5. Структурна схема вимірювального приладу зрівноважувального перетворення:

1 – первинний вимірювальний перетворювач; 2 – проміжний вимірювальний перетворювач; 3 – проміжний (передатний) перетворювач; 4 – вимірювальний механізм; 5 – нормувальний перетворювач; 6 – пристрій зворотного зв'язку; 7 – елемент порівняння (компаратор)

Характерною ознакою таких засобів є наявність зворотного зв'язку – зазвичай від'ємного. При цьому вихідний сигнал деякого з елементів "повертається" у зворотному напрямку й подається на вхід одного з попередніх елементів. Але для цього вихідному сигналу перетворюваного елементу потрібно надати такої форми, яку сприймає вхід вказаного попереднього елементу, тобто слід провести зворотне перетворення сигналу вимірювальної інформації (на наведеній схемі сигнал вигляду $\boldsymbol{w}$ зворотно перетворюється в сигнал вигляду $\boldsymbol{z_{зз}}$, який називають сигналом зворотного зв'язку). Ця операція

реалізується за допомогою спеціального перетворювача 6, що часто має назву *пристрою зворотного зв'язку* (ПЗЗ). Попри це, схема має ще один новий елемент – елемент порівняння ЕП (компаратор) 7, який виконує функцію порівняння двох величин ($\boldsymbol{z}$ і $\boldsymbol{z_{зз}}$).

Схема працює так. Сигнал $\boldsymbol{z}$, що виникає на вході ПВП, потрапляє на один із входів елемента порівняння (компаратора) 7, на другий вхід якого подається з протилежним знаком сигнал $\boldsymbol{z_{зз}}$ (компенсуючий або зрівноважувальний сигнал), сформований ПЗЗ 6. В результаті їх порівняння на виході компаратора 7 формується сигнал $\Delta\boldsymbol{z}$, пропорційний різниці $\boldsymbol{z - z_{зз}}$. Цей сигнал потрапляє в проміжний перетворювач 2, вихідний сигнал якого $\boldsymbol{v}$ (якщо таких проміжних перетворювачів декілька, – то з виходу останнього) надходить у проміжний (передатний) перетворювач 3 й одночасно на вхід ПЗЗ 6. Вихідний сигнал проміжного (передатного) перетворювача 3 далі надходить до вимірювального механізму 4 та нормуючого перетворювача 5 (як що такий є).

Залежно від типу проміжного перетворювача 2 за кожного значення вимірювальної величини різниця $\Delta\boldsymbol{z}$, що надходить на його вхід від елементу порівняння, може або зводитись до нуля (у пристроях з автоматичною автокомпенсацією, наприклад, в автоматичних мостах та потенціометрах), або мати деяке мале значення, пропорційне вимірювальній величині (у пристроях зі статичною автокомпенсацією – як, наприклад, у нормуючих перетворювачах).

Прикладом побудови вимірювального перетворювача зрівноважувального перетворення може бути буйковий рівномір з уніфікованим вихідним струмовим сигналом, принципова схема якого подана на рис.1.6.

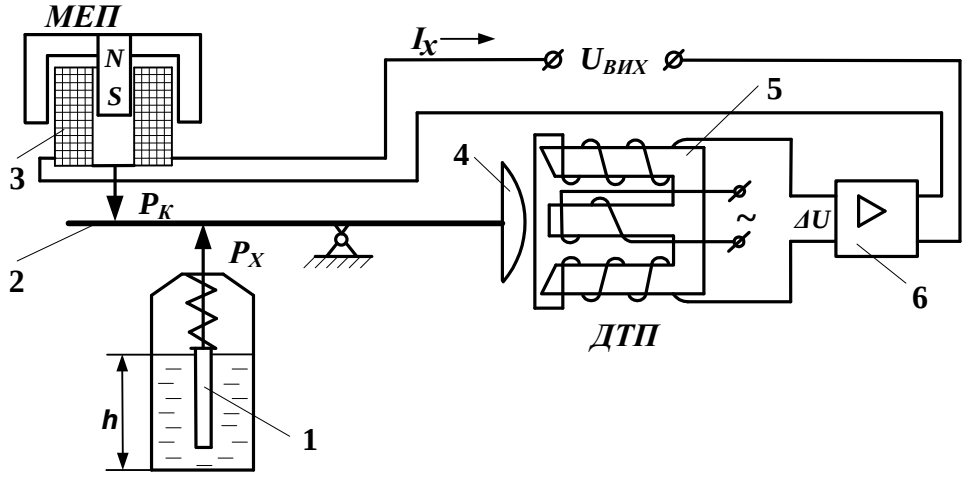


Рис. 1.6. Принципова схема буйкового рівноміра зрівноважувального перетворення:

1 – буйок; 2 – коромисло; 3 – вимірювальна обмотка магнітоелектричного перетворювача (МЕП); 4 – рухоме осердя диференціально-трансформаторного перетворювача (ДТП); 5 – нерухома частина магнітопроводу ДТП; 6 – підсилювач

Принцип дії буйкового рівноміра зрівноважувального перетворення полягає в наступному.

Якщо занурити буйок 1 в контрольовану рідину, на нього буде діяти виштовхувальна сила P_X, що переміщує буйок. Це переміщення за допомогою коромисла 2 спричиняє повертання осердя 4 ДТП. Нерухому частину магнітопроводу виконано у виді Ш-подібного осердя 5. На його середній стрижень намотано первинну намагнічувальну обмотку, що живиться від джерела змінної напруги. Дві ідентичні вимірювальні обмотки, намотані на крайні стрижні, утворюють два ідентичні перетворювальні елементи. Обмотки з'єднані послідовно та зустрічно.

Диференціально-трансформаторний перетворювач побудований так, що за нульового значення вимірюваного рівня чи деякого його номінального значення рухоме осердя 4 займає симетричне відносно обох перетворювальних елементів положення, наведені в них ЕРС будуть однаковими, а їх різниця дорівнюватиме нулю. Змінення вимірюваного рівня та відповідне переміщення рухомого осердя 4 змінюють потоки в окремих перетворювальних елементах і наведені в них ЕРС. З'являється певна різниця ЕРС, що подається на підсилювач 6, вихідна напруга якого після перетворення змінного струму в постійний надходить до вимірювальної обмотки зворотного магнітоелектричного перетворювача.

Струм I_x, що проходить через вимірювальну обмотку 3, взаємодіючи з полем постійного магніту, створює компенсаційне зусилля $P_к$, спрямоване назустріч виштовхувальній силі P_x, яка діє на буйок 1. Значення струму I_x, який проходить у момент рівноваги цих сил, буде мірою вимірюваного рівня h.

На таких самих принципах, тобто з реалізацією цих же методів вимірювання, ґрунтуються й *вимірювальні перетворювачі* (рис. 1.7, *а, б*).

У вимірювальних перетворювачах вимірювального механізму та відлікового пристрою немає, оскільки у них немає потреби.

Водночас до складу вимірювального перетворювача зазвичай входить *кінцевий перетворювач* 8, який зводить вихідний сигнал до уніфікованої форми, придатної для передачі, зберігання та оброблення.

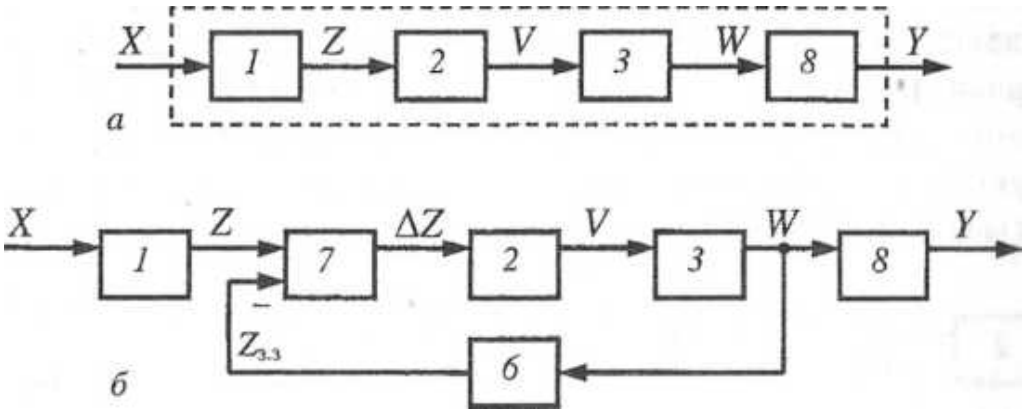


Рис. 1.7. Структурні схеми вимірювальних перетворювачів:
а – прямого; б – зрівноважувального

1.2.2. Статичні та динамічні характеристики засобів вимірювальної техніки

Статичні характеристики ЗВТ. *Статичною характеристикою* ЗВТ називають залежність інформативного параметра вихідного сигналу ЗВТ від інформативного параметра його вхідного сигналу в статичному режимі, тобто коли за час вимірювання вимірювана величина залишається незмінною. Статичну характеристику вимірювальних перетворювачів часто називають функцією перетворення, а статичну характеристику вимірювальних приладів іноді − характеристикою шкали.

У загальному випадку статична характеристика ЗВТ описується певним нелінійним рівнянням $y = f(x)$. Отримання статичної характеристики пов'язано з виконанням процедури градуювання, тобто з визначенням *градуювальної характеристики* ЗВТ, під котрою розуміють залежність між значеннями вимірюваних (перетворюваних) величин на виході та вході ЗВТ, одержаними під час градуювання (калібрування) та поданими у вигляді таблиці, графіка чи формули. На рис. 1.8, *а* подано різні види характеристик ЗВТ: нелінійну (крива 1), лінійну $y = kx + b$ та пропорційну з $b = 0$ (прямі 2,3).

За винятком спеціальних випадків, загальна вимога до статичної характеристики ЗВТ зводиться до отримання лінійної залежності між вихідними і вхідними значеннями (при цьому пікала вимірювального приладу буде рівномірною, тобто з рівномірно нанесеними позначками). На практиці ця вимога реалізується у загальному випадку тільки з деякою допустимою похибкою (наприклад, шкали автоматичних потенціометрів виробляються рівномірними, в той час, як градуювальні характеристики термопар насправді нелінійні).

Крім статичної характеристики, для охарактеризування метрологічних властивостей використовують ряд параметрів, які можна отримати як із самої статистичної характеристики засобу вимірювання (рис.1.8, *а*), так і за його шкалою (рис. 1.8, *б*). Це, зокрема, діапазон показань, діапазон вимірювань, нижня та верхня границі вимірювання.

Діапазон показань **засобу вимірювання** − інтервал значень вимірюваної величини, обмежений кінцевим та початковим її значеннями.

Початковим значенням $X_{\text{п}}$ **вимірюваної величини** називають найменше в діапазоні показань и значення, *кінцевім* $X_к$ − найбільше її значення.

Діапазон вимірювань − інтервал значень вимірюваної величини, в межах якого пронормовано похибки засобу вимірювання. Значення величин, які обмежують діапазон вимірювань знизу (зліва) та зверху (справа), називають відповідно *нижньою* X_H та *верхньою* $X_в$ *границями вимірювання*, тобто діапазон вимірювань $D_{вим} = X_в - X_н$. У технічних засобах вимірювання ці діапазони − вимірювань та показань − зазвичай збігаються.

Шкали з нульовою відміткою на початку шкали, тобто з $X_н = 0$, називаються односторонніми, шкали з нулем посередині – двосторонніми. Розрізняють також шкали однодіапазонні та багатодіапазонні.

Для кількісної оцінки впливу на вихідний сигнал ЗВТ вхідного сигналу в довільній точці статичної характеристики використовують границю відношення приросту ΔY вихідного сигналу до відповідного приросту вхідного сигналу ΔX, коли останній наближається до нуля, тобто величину похідної у вибраній точці статичної характеристики:

$$\lim_{\Delta \to 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dy}{dx} = S$$

Стосовно вимірювальних приладів цей параметр називають **чутливістю S**.

Чутливість вимірювального приладу з нелінійною статичною характеристикою (рис. 1.8, *а,* крива 1) буде неоднаковою у різних точках характеристики, а шкала приладу – нерівномірною (у технологічних вимірюваннях такі прилади зазвичай не використовують). Для визначення чутливості такого вимірювального приладу необхідно продиференціювати рівняння $y = f(x)$ за x, тобто його чутливість дорівнює першій похідній від характеристики його шкали (графічно S визначають тангенсом кута a нахилу дотичної, проведеної до вибраної точки A статичної характеристики). Прилади з лінійною та пропорційною статичними характеристиками мають незмінну у будь-якій точці шкали чутливість S – $\Delta y/\Delta x$ і відповідно – рівномірну шкалу. Тобто для таких приладів чутливість − властивість, яка визначається відношенням зміни вихідної величини ΔY до зміни вхідної (вимірюваної) величини ΔX, яка її зумовлює(розрізняють *абсолютну* S – Δy/Δx та *відносну* $So = \Delta y/(\Delta x/x)$ чутливість, де x – виміряне значення; $\Delta x/x$ – відносна зміна вимірюваної величини.).

Чутливість обернено пропорційно пов'язана з *ціною поділки C,* тобто з різницею значень вимірюваної величини між двома сусіднім позначкам шкали:

$$C = 1/S.$$

Порогом чутливості (інколи його позначають через $\Delta_{п.ч}$) називають найменше значення вимірюваної величини, яке можна виявити за допомогою засобу вимірювання (для аналогових приладів це таке значення вимірюваної величини, за якого покажчик відлікового пристрою зміщується на половину поділки).

Існує також поняття ***зони нечутливості*** засобу вимірювання, тобто такого діапазону значень вимірюваної величини, у межах якого її змінення не впливає на показання засобу вимірювання. Усі ці параметри належать до числових характеристик статичних властивостей ЗВТ.

Стосовно вимірювальних перетворювачів (їх статична характеристика також зазвичай лінійна) цей показник S – називають ***коефіцієнтом перетворення*** (таким він входить у рівняння перетворення вимірювального перетворювача: $Y = kX$), а в системах автоматичного регулювання − ***коефіцієнтом передачі.***

Сумарний коефіцієнт перетворення K визначають залежно від виду з'єднання структурних складових схеми (рис. 1.9). ***Порогом чутливості***

(інколи його позначають через $\Delta_{п.ч}$) називають найменше значення вимірюваної величини, яке можна виявити за допомогою засобу вимірювання (для аналогових приладів це таке значення вимірюваної величини, за якого покажчик відлікового пристрою зміщується на половину поділки).

Для послідовного з'єднання (рис. 1.9, *а*) рівняння перетворення записують у вигляді:

$$y = k_1 k_2 k_3 \ldots k_n x, \tag{1.10}$$

де $k_1 k_2 k_3 \ldots k_n$ – коефіцієнти перетворення відповідних функціональних елементів САК.

Тож *загальний коефіцієнт передачі K* системи дорівнюватиме добуткові коефіцієнтів перетворення всіх функціональних елементів системи:

$$K = \prod_{i=1}^{n} k_i. \tag{1.11}$$

К − компаратор (позначка «+» − додатний зворотний зв’язок; позначка «−» − від’ємний зворотний зв’язок)

Для паралельного з'єднання (рис. 1.9, *б*) відповідно

$$y = k_1 x \pm k_2 x \pm k_3 x \pm \ldots \pm k_n x = \\ = (k_1 \pm k_2 \pm k_3 \pm \ldots \pm k_n) x = Kx, \tag{1.12}$$

де

$$K = \sum_{i=1}^{n} k_i. \tag{1.13}$$

Знайдемо вираз для визначення *K* зустрічно-паралельного з'єднання функціональних елементів системи (рис. 1.9, *в*), тобто за наявності в ньому зворотного зв'язку.

Із схеми видно, що

$$y = k_{ПК}(x \pm k_{ЗЗ} y), \tag{1.14}$$

де $k_{ПК}$ та $k_{ЗЗ}$ − коефіцієнти перетворення прямого каналу та каналу зворотного зв'язку.

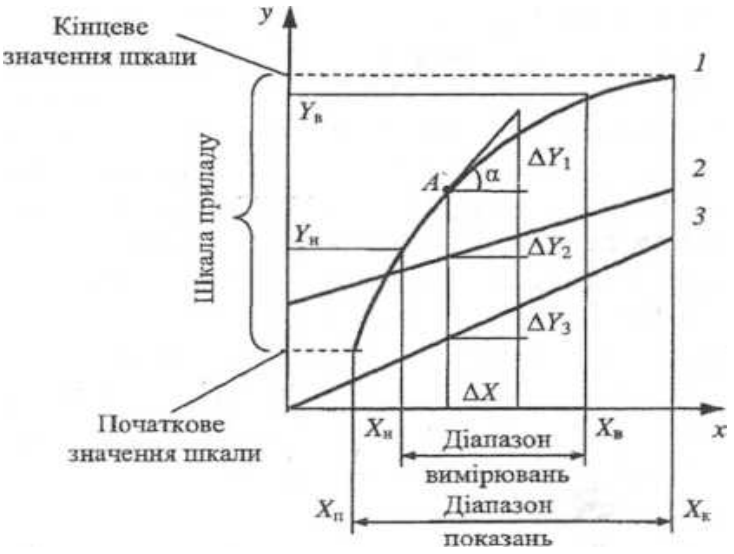
Розв’язавши рівняння перетворення (1.14) відносно *y*, отримаємо:

$$y = \frac{k_{ПК}}{1 \pm k_{ПК} k_{ЗЗ}} x, \tag{1.15}$$

За виразом:

$$K = \frac{k_{ПК}}{1 \pm k_{ПК} k_{ЗЗ}} \tag{1.16}$$

визначається загальний коефіцієнт передачі *K* із зустрічно-паралельним з'єднанням функціональних елементів. Позначка «−» належить додатному зворотному зв’язку; позначка «+» − від’ємному зворотному зв’язку.



а



б

Рис. 1.8. Вигляд статистичних характеристик (*а*) та рівномірної шкали (*б*) засобів вимірювання

Для зустрічно-паралельного з'єднання функціональних елементів із від'ємним зворотним зв'язком загальний коефіцієнт передачі K визначається за виразом:

$$K = \frac{k_{ПК}}{1 + k_{ПК} k_{ЗЗ}}. \qquad (1.17)$$

Після ділення чисельника та знаменника у виразі (1.17) на коефіцієнт перетворення прямого каналу $k_{ПК}$, отримаємо вираз для визначення загального коефіцієнта передачі K для зустрічно-паралельного з'єднання функціональних елементів із від'ємним зворотним зв'язком у вигляді:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_{ПК}} + k_{ЗЗ}}. \qquad (1.18)$$

Якщо припустити, що $k_{ПК} >> 1$, то вираз (1.18) набуде вигляду:

$$K = \frac{1}{k_{ЗЗ.}}. \qquad (1.19)$$

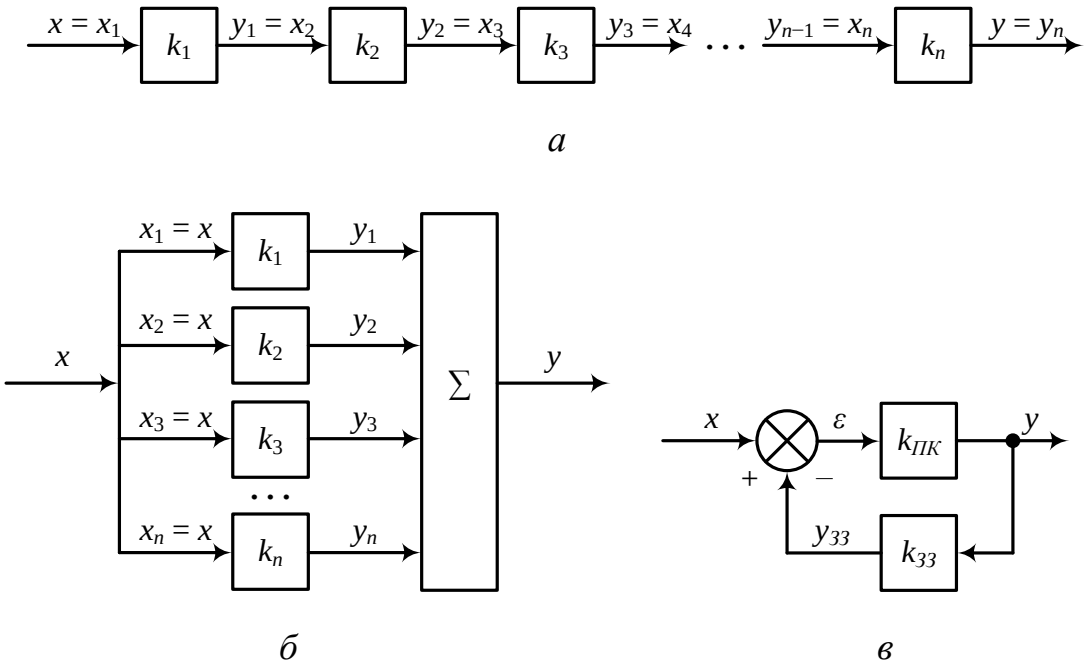


Рис. 1.9. Структурні схеми з'єднань перетворювальних елементів:
а – послідовного; *б* – паралельного; *в* – зустрічно-паралельного

Як видно з виразу (1.19), за досить великого коефіцієнта передачі прямого каналу $k_{ПК}$ метрологічні властивості засобу вимірювання визначаються властивостями застосованого в ньому пристрою від'ємного зворотного зв'язку. Тобто навіть у разі відносно малої точності вимірювання прямого каналу (а оскільки він містить декілька перетворювальних елементів, то для підвищення його точності всі вони мають бути високоточними) достатньо оснастити технічний засіб автоматики одним високоточним елементом – пристроєм від'ємного зворотного зв'язку, що б отримати високоточний у цілому технічний засіб автоматики (вимірювальний прилад чи перетворювач).

Використовують також додатний зворотний зв'язок. Його застосовують для збільшення загального коефіцієнта передачі, який визначають за виразом:

$$K = \frac{k_{ПК}}{1 - k_{ПК} k_{ЗЗ}}. \qquad (1.20)$$

Застосування цього виду зворотного зв'язку сприяє зростанню коефіцієнта перетворення (передачі) та підвищенню швидкодії, але водночас погіршує стабільність цього коефіцієнта, а в системах керування – знижує їх стійкість.

Для переважної кількості вимірювальних приладів і перетворювачів використовують саме від'ємний зворотний зв'язок, інколи – комбінацію обох видів зворотного зв'язку.

Слід зазначити, що тільки статична характеристика ідеального перетворювача лінійна, стабільна (тобто незмінна в часі) та проходить через

початок координат (рис. 1.8, *а,* пряма 3). Характеристика ж реального вимірювального перетворювача у статиці може відрізнятися від ідеальної

(Y = kX) зсувом нуля (адитивна похибка $\Delta_{ад}$), зміною нахилу (мультипліка- тивна похибка $\gamma_м$), нелінійною складовою Δf (X):

$$Y = k(1 + \gamma_M) + \Delta_{ад} + \Delta f(X)$$

Такі відхилення реальної характеристики вимірювального перетворювача спричиняють виникнення адитивної та мультиплікативної похибок, а також похибки від нелінійності.

Динамічні характеристики ЗВТ. Режим роботи ЗВТ, за якого значення вимірюваної величини протягом часу вимірювання змінюється, називають *динамічним* (нестаціонарним, нерівноважним).

Майже всі ЗВТ (тобто перетворювачі та прилади) мають у своєму складі різні інерційні елементи, а саме: рухомі механічні вузли, електричні чи пневматичні ємності, індуктивності, лінії затримки, елементи, що мають теплову інерцію тощо. Інерційні елементи в складі ЗВТ зумовлюють їх інерційність у цілому. Інерційні властивості засобів вимірювання визначають за їхніми динамічними характеристиками.

Динамічна характеристика ЗВТ у загальному випадку – це залежність між інформативними параметрами вихідного та вхідного сигналів у динамічному режимі, тобто в часі. Динамічні характеристики ЗВ, як і динамічні властивості об'єктів та систем керування, описують диференціальними рівняннями, передавальними функціями або комплексними частотними функціями.

Динамічну характеристику в лінійній частині статичної характеристики можна описати звичайним диференціальним рівнянням

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = kx(t) \qquad (1.21)$$

У загальному вигляді права частина виглядатиме як

$$b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + \cdots + b_0 x(t)$$

Для переходу від диференціальних рівнянь до алгебричних найчастіше використовують перетворення Лапласа, яке служить для перетворення функції дійсної змінної t у функцію комплексної змінної p і описується рівнянням

$$F(p) = \int_0^\infty f(t) e^{-pt} dt$$

де p- оператор Лапласа.

Це − пряме перетворення Лапласа. Тут функція $f(t)$ називається *оригіналом,* а отримана в результаті перетворення функція *F(p) − зображенням.* Скорочено операцію такого перетворення записують так: *F(p)*=L[f(t)] виконавши пряме перетворення рівняння (1.21) за загальною формулою

$$\frac{d^i}{dt^i} = p^i$$

отримаємо відповідне йому алгебричне рівняння

$$[a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \cdots + a_2 p^2 + a_1 p + 1] y(p) = k_1 x(p) \qquad (1.22)$$

Розв'язавши алгебричне рівняння (1.22) і отримавши розв'язок (значення коренів) в області зображень *x(p),* до функції дійсної змінної *x*(*t*) переходимо через зворотне перетворення Лапласа, яке скорочено записують у вигляді $f(t) = L^{-1}[F(p)]$.

Найчастіше математичну модель динаміки подають у вигляді передавальних функцій. ***Передавальна функція W(p)*** − це відношення зображення виходу *y*(*p*) до зображення входу *x*(*p*) за нульових початкових умов:

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)}$$

Таким чином, рівняння (1.21) можна записати у вигляді передавальної функції вигляду

$$W(p) = \frac{k}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \cdots + a_1 p + 1} \qquad (1.23)$$

Передавальна функція (1.20), як і диференціальне рівняння (1.21), є вичерпною характеристикою інерційних властивостей ЗВТ. Вона дозволяє визначити реакцію ЗВТ на вхідні сигнали, котрі змінюються у часі за будь-яким законом.

Ще одна динамічна характеристика – ***перехідна характеристика*** **h(t),** під якою розуміють реакцію ЗВТ на зміну вхідної величини у вигляді одиничної східчастої функції $x_0 = X_2 - X_1 = 1(t)$ (рис. 1.10). Перехідну характеристику зазвичай зображають у вигляді графіка.

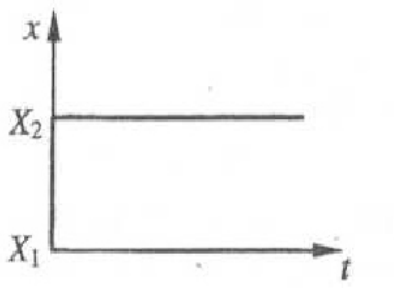


Рис. 1.10. Графік одиничної східчастої зміни вхідної величини

Для полегшення математичного опису динамічних властивостей ЗВТ (та інших об'єктів математичного моделювання) їх подають у вигляді певних сукупностей типових елементарних динамічних ланок, динамічні властивості яких відомі й можуть бути записані звичайними диференціальними рівняннями першого та другого порядків із постійними коефіцієнтами чи відповідними передавальними функціями.

Залежно від алгоритму, відповідно до якого відбувається перетворення вхідної величини у вихідну, розрізняють такі основні елементарні динамічні ланки: без інерційну, чистого запізнення, аперіодичну першого порядку, інтегрувальну, диференціювальну та коливальну.

1.2.3. Похибки засобів вимірювальної техніки

Точність вимірювання – основний показник як якості вимірювання, так і ступеня досконалості вимірювальних засобів. У першому випадку точність вимірювання – це головна характеристика якості вимірювання, що відображає наближеність результату вимірювання до *істинного значення* вимірюваної величини, тобто такого, яке ідеально відображало б певну властивість об'єкта. У другому – точність вимірювання є характеристикою засобу вимірювальної техніки (ЗВТ), яка визначає наближеність його показань до істинного значення вимірюваної величини.

На відміну від істинного значення фізичної величини, яке не можна виміряти в принципі з огляду на обмеження декретування речовини та енергії, за *дійсне (умовно істинне) значення* фізичної величини беруть її значення, знайдене експериментально і настільки наближене до істинного, що його можна використати замість істинного для конкретної мети. У технічних вимірюваннях за дійсне значення вимірюваної величини беруть її значення, виміряне зразковим ЗВТ. ДСТУ 2681-94 розрізняє два види зразкових ЗВТ: *просто зразковий* ЗВТ, призначений для вивіряння інших ЗВТ і затверджений як зразковий, і *вихідний зразковий* ЗВТ, тобто такий, що має метрологічні характеристики, які відповідають найвищому ступеню вивіряльної схеми метрологічної служби. Слід зазначити, що до зразкових ЗВТ, окрім вимоги до їх похибки, яка має не перевищувати 1/3 похибки перевірюваного ЗВТ, висунуто також високі вимоги до збіжності результатів вимірювань, тобто мінімізації випадкової складової похибки вимірювання.

Кількісно точність вимірювання найчастіше характеризують числом, обернено пропорційним модулю відносної похибки: $\varepsilon = 1/|\delta|$. Наприклад, якщо $\delta = 0{,}001$, то $\varepsilon = 1000$. Через очевидну незручність подібну оцінку точності застосовують рідко, здебільшого для якісної характеристики вимірювань: низька точність, висока точність тощо. Тому для оцінювання точності як самих вимірювань, так і ЗВТ частіше використовують похибки.

Результат будь-якого вимірювання відрізняється від дійсного значення вимірюваної величини на деяке значення, залежне від точності засобів і методу вимірювання, кваліфікації оператора, умов, при яких проводиться вимірювання. Відхилення результату вимірювання від дійсного значення вимірюваної величини називається *похибкою вимірювання.*

Залежно від статичних та динамічних властивостей ЗВТ їм притаманні *статичні* та *динамічні похибки*.

Статичні похибки можна розглядати як окремий випадок динамічних (вони повністю входять у математичний опис останніх, для отримання якого застосовують такий математичний апарат, як і для опису динамічних властивостей ЗВТ), однак у практиці вимірювань їх зазвичай розглядають окремо,

особливо у разі вимірювань постійних і квазіпостійних величин. А такими, зокрема, слід вважати й параметри більшості сільськогосподарських технологічних процесів, тому надалі увагу буде приділено розгляду саме статичних похибок.

За способом вираження розрізняють *абсолютні, відносні* та *зведені похибки* ЗВТ, причому окремо для засобів вимірювання (здебільшого − вимірювальних приладів) і вимірювальних перетворювачів, оскільки похибки останніх розрізняють також за входом і виходом.

Абсолютна похибка засобу вимірювання − це різниця між виміряним і істинним значенням вимірюваної величини, що виражена в одиницях вимірюваної фізичної величини.

Абсолютна похибка вимірювального перетворювача за входом Δ_X − це різниця між значенням вхідної величини вимірювального перетворювача X_P та дійсним значенням вхідної величини $X_Д$:

$$\Delta_X = X_P - X_Д, \tag{1.24}$$

де $X_P = \varphi(Y_Д)$ − значення вхідної величини вимірювального перетворювача, визначене для дійсного значення його вихідної величини $Y_Д$, за допомогою градуювальної характеристики або функції перетворення $Y = f(X)$ через обернене $X = \varphi(Y)$ перетворення ($Y_Д$ − дійсне значення вихідної величини вимірювального перетворювача, виміряне на його виході зразковим приладом).

Отже, остаточно маємо:

$$\Delta_X = \varphi(Y_Д) - X_Д, \tag{1.25}$$

Абсолютна похибка вимірювального перетворювача за виходом Δ_Y − це різниця між дійсним значенням вихідної величини вимірювального перетворювача $Y_Д$, яке відповідає вхідній величині, та значенням вихідної величини Y_P, одержаної за дійсним значенням вхідної величини за допомогою градуювальної характеристики $Y = f(X)$:

$$\Delta_Y = Y_Д - Y_P, \tag{1.26}$$

де $Y_P = f(X_Д)$.

Тоді

$$\Delta_Y = Y_Д - f(X_Д). \tag{1.27}$$

Відносною похибкою засобу вимірювання δ називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювання до істинного (умовно істинного) значення вимірюваної величини. Значення такої похибки обчислюють за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_Д} \cdot 100. \tag{1.28}$$

Вона характеризує точність вимірювання.

Значення відносних похибок вимірювального перетворювача за входом і виходом використовують і визначають за формулами:

$$\delta_x = \Delta_x \cdot \frac{100}{X_д} = 100\left[\varphi\left(Y_д\right) - X_д\right]/X_д \tag{1.29}$$

$$\delta_x = \Delta_y \cdot \frac{100}{Y_p} = 100\left[\left(Y_д\right) - f\left(X_д\right)\right]/f(X_д) \tag{1.30}$$

Точність засобу вимірювання характеризує *зведена похибка γ*, яку визначають як відношення його абсолютної похибки до нормувального значення вимірюваної величини $X_{НОРМ}$:

$$\gamma = \Delta \cdot 100 / X_{\text{норм}} \qquad (1.31)$$

де $X_{НОРМ}$ − дорівнює одному з таких значень:

– кінцевому значенню шкали (для засобів вимірювання з рівномірною та степеневою шкалою, яка починається з нульової позначки);

– діапазонові вимірювань (для засобів вимірювання з «придушеним» нулем, тобто зі шкалою, що починається не з нульової позначки);

– сумі кінцевих значень робочої частини шкали з нульовою позначкою посередині.

Підставляючи у формулу (1.31) отримані вище вирази Δ_X і Δ_Y, можна отримати вирази для визначення зведених похибок вимірювального перетворювача за входом і виходом.

За характером змінюваності під час повторних вимірювань похибки поділяють на систематичні та випадкові.

Систематична похибка засобу вимірювання – це складова похибки засобу вимірювання, що приймається постійною або такою, що закономірно змінюється в ряді вимірювань однієї величини. Систематична похибка одного екземпляра засобу вимірювання, як правило, відрізнятиметься від систематичної погрішності іншого екземпляра засобу вимірювання цього ж типу, унаслідок чого для групи однотипних вимірювань систематична погрішність може іноді розглядатися як випадкова погрішність.

Випадкова похибка засобу вимірювання – це складова похибка ЗВТ, що змінюється випадковим чином в ряді вимірювань однієї величини.

Залежно від умов експлуатації ЗВТ властиві також основні та додаткові похибки.

Основна похибка – це похибка ЗВТ, що виникає за нормальних умов його експлуатації. Нормальними називають такі умови застосування ЗВТ, за яких впливові величини мають нормальні значення чи перебувають в інтервалі нормальних значень. Визначальні параметри нормальних умов експлуатації ЗВ наводять у його технічному паспорті.

Додаткова похибка – це похибка ЗВТ, яка додатково виникає під час використання його в таких умовах, коли хоча б одна з впливових величин має відхилення від нормального значення або виходить за межі інтервалу нормальних значень.

Залежно від вимірюваної величини X розрізняють похибки *адитивні*, *мультиплікативні*, *лінійності* та *гістерезису* (варіація). Перш ніж аналізувати ці типи похибок, з'ясуймо поняття, які зручно використовувати для розгляду залежності похибки ЗВТ від значень вимірюваної величини. Такими є поняття *номінальної* та *реальної* характеристик (функцій перетворення) ЗВТ.

Номінальною (ідеальною) $f_н$ називають характеристику (функцію перетворення), приписану партії однотипних ЗВТ, зазначену в їхньому паспорті та використовувану під час вимірювань.

Реальною $f_Р$ називають характеристику (функцію перетворення), зняту

експериментально для конкретного ЗВТ.

Через недосконаліть конструкції та технології виготовлення реальна характеристика (функція перетворення) ЗВТ відрізняється від номінальної. Саме характер цього відхилення й спричинює появу згаданих похибок. По суті, ці терміни описують форми меж (смуг) похибок.

Адитивною похибкою $\Delta_{АД}$ ЗВТ (рис. 1.11, *а*) називають складову абсолютної похибки ЗВТ, яка не залежить від вимірюваної величини (її ще називають ***похибкою нуля*** Δ_0). Це поняття застосовують як до випадкових, так і до систематичних похибок.

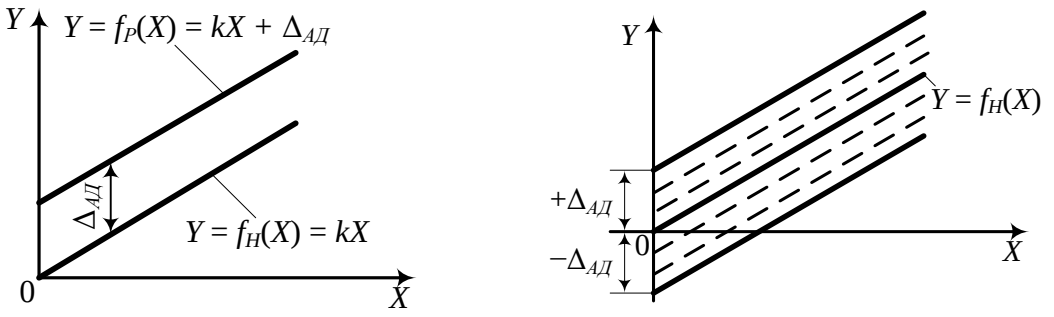
До ***систематичних адитивних*** похибок належать похибки від стороннього вантажу на шальках вагів, від неточного встановлення приладу на нуль перед вимірюванням, від термо-ЕРС в електричних колах постійного струму, від адитивної завади на вході ЗВТ тощо. Для усунення таких похибок у конструкціях багатьох ЗВТ передбачено механічний або електричний пристрій для виставляння нуля (коректор нуля).

Випадкову адитивну похибку усунути неможливо, а реальна функція перетворення ЗВТ при цьому зміщується відносно номінальної у часі непередбачуваним чином. Це призводить до того, що багаторазово зняті реальні функції перетворення ЗВТ займають на графіку певну смугу, ширина якої залишається постійною за будь-яких значень вимірюваної величини (рис. 1.11, *б*). Тому в теорії вимірювань використовують поняття *смуги невизначеності* або *смуги похибок* конкретного приладу чи перетворювача. До речі, деяку детерміновану середню лінію цієї смуги й беруть за номінальну функцію перетворення для групи однотипних ЗВТ.

Прикладами випадкових адитивних похибок є похибки від тертя в опорах, від наведення змінної ЕРС на вході ЗВТ, від шумів, контактного опору, дрейфу нуля тощо.

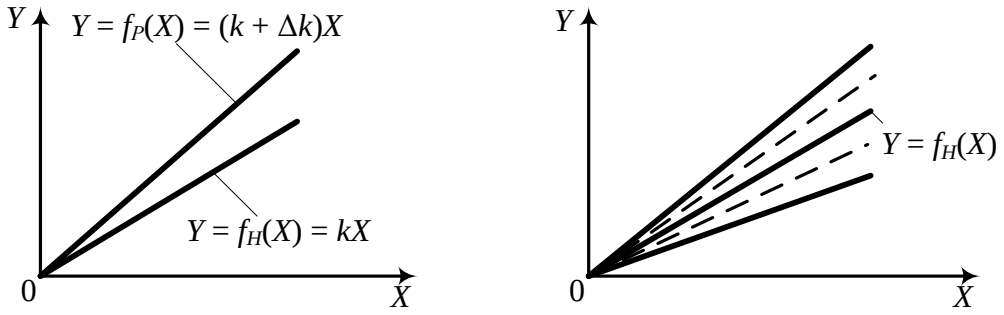
Мультиплікативною Δ_M ***похибкою*** ЗВТ називають складову абсолютної похибки ЗВТ, яка пропорційна вимірюваній величині, а якщо $X = 0$, Δ_M також дорівнює нулю (її ще подають як *похибку чутливості* Δ_S).

Графічно її зображують поворотом реальної функції перетворення відносно номінальної (рис. 1.12, *а*). Якщо Δ_M випадкова, то реальна функція перетворення матиме вигляд відповідної смуги похибок (рис. 1.12, *б*).



а *б*

Рис. 1.11. Графік адитивних похибок:
а – одиночної; *б* – смуги похибок



а *б*

Рис. 1.12. Графіки мультиплікативних похибок:
а – одиночної; *б* – смуги похибок

Причинами виникнення мультиплікативних похибок можуть бути зміни:

коефіцієнтів перетворення окремих елементів і вузлів ЗВТ (наприклад, зміна коефіцієнта підсилення підсилювача або нагрівання одного з плечей важільних терезів сонячним промінням);

жорсткості мембрани манометра або пружин приладу (наприклад, спіральних пружин-струмопідводів мілівольтметра);

опорної напруги в цифровому вольтметрі;

швидкості течії вимірюваного середовища під час вимірювання його температури заглибним термометром тощо.

Якщо номінальна функція перетворення лінійна, то відхилення реальної функції перетворення від номінальної, зумовлене нелінійними ефектами, називають ***похибкою лінійності*** $\Delta_Л$ (рис. 1.13). Причинами виникнення такої похибки можуть бути недосконаліть конструкції (схеми) вимірювального пристрою і технології його виготовлення.

Найсуттєвіша та важко усувна систематична похибка − похибка гістерезису або варіація показань. ***Варіацією показань засобу вимірювання*** v_Y називають різницю між двома його показаннями, коли одне й те саме значення вимірюваної величини X_1 досягається внаслідок її збільшення (на рис. 1.14 − за графіком так званого прямого ходу реальної функції перетворення $f_{Р.П.Х}$) − $Y_{1.П.Х}$ чи зменшення (за графіком зворотного ходу реальної функції перетворення $f_{Р.З.Х}$) − $Y_{1.З.Х}$.

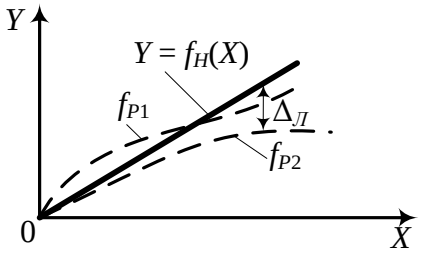


Рис. 1.13. Графік похибки лінійності

Тож абсолютне значення варіації $v_{Y.i}$ визначають з виразу

$$|v_{Y.i}| = Y_{1.П.Х} - Y_{1.З.Х}, \qquad (1.32)$$

а зведене значення – згідно з рівнянням (1.31) − як відношення абсолютного значення варіації v_Y до діапазону вимірювань.

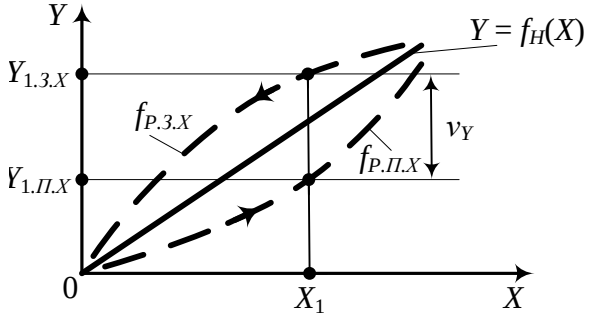


Рис. 1.14. Графік похибки гістерезису (варіація)

Варіація вихідної величини вимірювального перетворювача – це різниця між двома значеннями вихідної величини вимірювального перетворювача,

що відповідають одному й тому ж значенню вхідної величини, досягнутому

внаслідок її збільшення або зменшення.

До причин гістерезису належать люфт і сухе тертя в механічних передатних елементах (наприклад, фрикційних, пасових), гістерезисний ефект у феромагнітних матеріалах, внутрішнє тертя в матеріалах пружин, пружна післядія в пружних ЧЕ, поляризація в електричних, п'єзоелектричних та електрохімічних елементах тощо.

Нормоване значення похибки – це величина похибки, яка враховує технологічний розкид *серії* вимірювальних перетворювачів, що виготовляються, і є граничною *для всіх перетворювачів* даного типу. Похибка будь-якого приладу з даної серії може бути менше граничної, але не може перевищувати її. Нормоване значення похибки заноситься в паспорт вимірювального засобу.

Номінальна характеристика – що розповсюджується на всі засоби вимірювань даного типу, на відміну від *індивідуальної* характеристики, яка розповсюджується тільки на конкретний екземпляр приладу.

Клас точності указує нормоване значення похибки у відсотках. Проте клас точності враховує цілу сукупність метрологічних характеристик, таких як, наприклад, нестабільність похибки протягом року, опір ізоляції, і ін. Клас точності 0,1 може бути привласнений перетворювачу, що має погрішність 0,1 %. Для вказівки мультиплікативній похибки клас точності поміщається в кружок, для вказівки адитивній похибки указується просто число без додаткових символів.

Діапазон вимірювань – область значень вимірюваної величини, в межах яких нормовані допустимі межі похибки засобу вимірювань.

Динамічний діапазон – це відношення межі вимірювання до порогу чутливості, зазвичай виражається в децибелах. Для вимірювань в широкому динамічному діапазоні використовують вимірювальні перетворювачі з перемиканими діапазонами вимірювань. Під час перемикання діапазонів відбу-

вається зміна схеми з'єднання елементів, при якій динамічний діапазон зрушується у бік великих або менших значень вимірюваної величини. У автоматизованих системах перемикання діапазонів вимірювань виконується автоматично, за програмою, записаною в комп'ютер або контролер.

Відтворюваність результатів вимірювань характеризує близькість результатів вимірювань, виконаних різними засобами в різний час в різних місцях. Оцінка відтворюваності дозволяє виявити грубі похибки в процесі вимірювань або некоректно поставлені методики вимірювань, вплив зовнішніх чинників, що важко враховуються.

Калібрування – сукупність операцій, що дозволяють визначити поправки до свідчень засобу вимірювань або оцінити похибку цих засобів.

Перевірка – встановлення офіційно уповноваженим органом придатності засобу вимірювань до застосування. Перевірці піддають засоби вимірювань, що підлягають державному метрологічному контролю і нагляду.

1.2.4. Нормування метрологічних характеристик і класи точності засобів вимірювальної техніки

Метрологічними характеристиками називають характеристики ЗВТ, які нормуються для визначення результату вимірювання та його похибок. До основних метрологічних характеристик належать: *діапазон вимірювань (показань) та різні складові похибки ЗВТ, поріг чутливості, коефіцієнт перетворення, стала часу, час перехідного процесу, варіація показань тощо*.

Засоби вимірювальної техніки допускаються до застосування тільки в тому разі, якщо, по-перше, їхні метрологічні характеристики унормовані, тобто регламентовані відповідними нормативно-технічними документами, а по-друге, перевіркою доведено відповідність дійсних (визначених експериментально) метрологічних характеристик ЗВТ унормованим. Застосування ЗВТ, які вчасно й належним чином не перевірені, заборонено.

Різні ЗВТ (ПВП, вимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні канали інформаційно-вимірювальних комплексів та систем і т. ін.) мають похибки, характер прояву яких може бути істотно різним: в одних похибка майже адитивна, у других наявні як адитивна, так і мультиплікативна складові, у третіх – залежність похибки від вимірюваної величини ще складніша. Кожен конкретний ЗВТ має випадкову та систематичну складові похибки, причому їх співвідношення теж може бути різним. Крім того, умови роботи (а отже, впливові чинники) навіть однотипних ЗВТ можуть бути різними.

Для того щоб орієнтуватися в метрологічних властивостях конкретного ЗВТ та щоб завчасно оцінити похибку, яку внесе цей ЗВТ у конкретний результат вимірювань, використовують його нормовані метрологічні характеристики.

Загальний підхід до нормування метрологічних характеристик ЗВТ полягає в тому, що для всіх нормованих функцій і значень установлюють номінальні функції та номінальні значення (наприклад: номінальну функцію

перетворення, номінальну функцію впливу, номінальне значення інформативного параметра, номінальне значення сталої часу тощо), а також гранично допустимі відхилення. Для інших характеристик (і похибок також) установлюють тільки гранично допустимі значення (наприклад, основної похибки, варіації).

Таким чином, під нормованим значенням розуміють похибки, граничні для конкретного типу ЗВТ. При цьому як систематична, так і випадкова складові похибки окремих ЗВТ того самого типу можуть розрізнятися, однак у цілому для цього типу ЗВТ похибки не повинні перевищувати гарантованого значення. Так нормуються основна та додаткова похибки. Саме ці межі основної похибки, а також коефіцієнтів впливу заносять у паспорт кожного екземпляра ЗВТ.

Правила, згідно з якими призначають граничнодопустимі значення похибки і форму запису, інакше кажучи, всю процедуру нормування похибки ЗВТ, ґрунтуються на системі стандартів, які забезпечують єдність вимірювань. Основна відмінність між способами нормування зумовлена різними співвідношеннями адитивної та мультиплікативної складових у похибці різних ЗВТ.

Важливою метрологічною характеристикою ЗВТ є його ***клас точності*** $К_т$ – узагальнена характеристика, що визначається гранично допустимими значеннями основної та додаткових похибок ЗВТ, а також іншими характеристиками, що впливають на точність його показань і значення яких регламентуються.

Відзначимо, що для технічних ЗВТ клас точності визначається гранично допустимими значеннями тільки основної похибки, оскільки такі ЗВТ призначені для експлуатації лише в нормальних умовах, а тому припускають, що додаткових похибок у них не буває.

Клас точності ЗВТ маркують на його шкалі, використовуючи додатні числа такого ряду: $[1; 1{,}5; (1{,}6); 2; 2{,}5; (3); 4; 5; 6]\cdot 10^n$ де n = 1, 0, -1, -2,... Числа 1,6 і 3 допускаються до використання, але не рекомендуються.

Для того щоб розрізняти, яка з похибок унормована, тобто взята за клас точності, використовують спеціальні умовні позначення класів точності, форма яких залежить від способу задавання допустимої основної похибки. Стосовно ЗВТ, використовуваних у технологічних вимірюваннях, застосовують такі три способи позначення класів точності.

Якщо клас точності позначено у вигляді окремого числа в кружечку, це означає, що для цього ЗВТ припускають суто мультиплікативну смугу похибок. Реальні ЗВТ, як і людина, рідко «хворіють» лише одним видом похибок зазвичай усіма потроху, однак часто одна з них домінує над іншими. Абсолютна похибка таких ЗВТ $\Delta_м(x)$ пропорційна поточному значенню x вимірюваної величини, тому відносна похибка $\delta_м(x)$ є незмінною величиною для будь-якого значення x і саме її зручно використовувати для нормування похибок ЗВТ та вказування його класу точності, тобто $К_т = \delta_м(x)$. У цьому разі:

– *відносна похибка вимірювання*

$$\delta(x) = K$$

– *абсолютна похибка вимірювання*

$$\Delta(X) = K_T X_i/100$$

У такий спосіб нормуються похибки масштабних перетворювачів (подільників напруги, шунтів, вимірювальних трансформаторів струму, напруги тощо). Засоби вимірювальної техніки, у яких точність (відносна похибка вимірювання) не залежить від вимірюваної величини, тобто залишається сталою для будь-якої точки діапазону вимірювань, інколи називають ідеальними. Серед ЗВТ, використовуваних для технологічних вимірювань, до таких належать тільки ротаметри.

Якщо клас точності позначено одним числом без кружечка чи «галочки» (нею позначають класи точності ЗВТ зі значною нерівномірністю шкали), це означає, що для цього ЗВТ беруть суто адитивну смугу похибок, а отже, для будь-якого значення x адитивна складова похибки $\Delta_{ад}$ = const. Але тут нормують не абсолютну (це незручно, бо для багатограничних приладів для кожного піддіапазону вона буде різною, і в паспорті на такий ЗВТ довелося б перераховувати ці значення для кожного піддіапазону), а зведену адитивну похибку $\gamma_{ад} = \Delta_{ад} / X_{норм}$, яку й беруть за клас точності: чисельно $К_т = \gamma_{ад}$. Тоді похибки вимірювання:

– *абсолютна*

$$\Delta(X) = \frac{\gamma_{ад} X_{норм}}{100} = K_T X_{норм}/100$$

– *відносна*

$$\delta(X_i) = \left(\frac{\Delta(X)}{X_i}\right) \cdot 100 = K_T X_{норм}/X_i$$

Тому під час вимірювання, крім відліку значення вимірюваної величини X_i та класу точності $К_т$, обов'язково слід фіксувати $X_{норм}$ (тобто верхню границю вимірювання $X_в$, якщо шкала приладу починається з нульової позначки, або весь діапазон вимірювань, якщо шкала починається не з нуля), інакше обчислити похибку буде неможливо.

Зазначимо, вважати, що, скажімо, вольтметр класу точності 1,0 у всьому діапазоні вимірювань забезпечує результати з похибкою ± 1,0 %, – велика помилка. Насправді поточне значення відносної, похибки $\delta(X_i) = (\Delta_{ад} / X_i)$ 100, тобто зростає обернено пропорційно значенню *x* і змінюється за гіперболою (рис. 1.15). Тож відносна похибка $\delta(x)$ дорівнює класові точності $К_т$ приладу лише на останній позначці шкали, тобто для $X=X_в$. Якщо $X = 0{,}1X_В$, то похибка $\delta(X)$ у 10 разів більша за $\gamma_{ад}$, тобто за $К_т$. Зі зменшенням вимірюваної величини X до значення $\Delta_{ад}$ відносна похибка результату вимірювання досягає $\delta(X) = (\Delta_{ад}/ \Delta_{ад})$ 100 = 100 %, а за умови подальшого зменшення X ця похибка $\delta(X) – \infty$.

Повний діапазон $D_п$ вимірювань для будь-якого ЗВТ (рис. 1.15) обмежується знизу порогом чутливості, а зверху – верхньою границею

вимірювання. А позаяк в інтервалі малих значень X похибка вимірювання дуже велика, то робочий діапазон $D_Р$ обмежують знизу таким значенням вимірюваної величини X, щоб відносна похибка вимірювання δ(X) не перевищувала наперед заданого значення $\delta_{зд}$, яке дорівнює, наприклад, 2, 5 або 10 %.

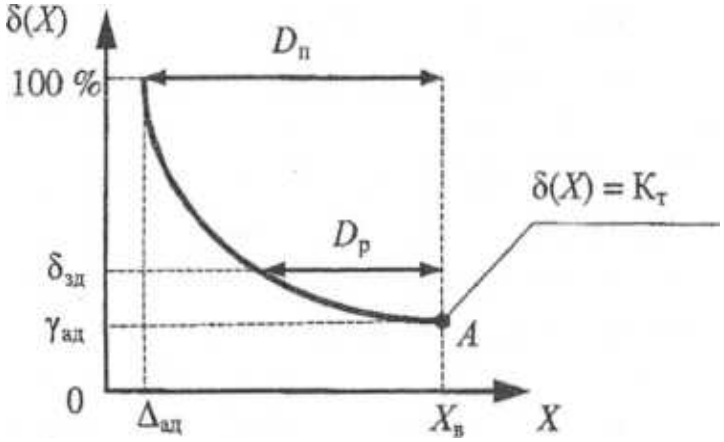


Рис. 1.15.Характер змінюваності відносної похибки для ЗВТ із суто адаптивною смугою похибок

Отже, робочий діапазон $D_р$ призначають досить довільно – він становить тільки якусь частину повного діапазону ЗВТ. У цьому, власне, і полягає негативний вплив адитивної похибки, яка не дозволяє використовувати один і той же ЗВТ для вимірювань і великих, і малих величин.

Абсолютну більшість технічних ЗВТ, які використовують у технологічних вимірюваннях, унормовано саме так, тобто їх клас точності $К_Т = \gamma_{ад}$.

Якщо клас точності позначено у вигляді дробу $\gamma_в / \gamma_н$, це означає, що для цього ЗВТ одночасно враховують обидві смуги похибок: і мультиплікативну, і адитивну. Тоді похибки обчислюють за такими виразами:

– відносна похибка

$$\delta(X_i) = \gamma_B + \gamma_H\left(\left|\frac{X_B}{X_i}\right| - 1\right)$$

– абсолютна похибка

$$\Delta(X_i) = \delta(X_i)X_i/100$$

де $\gamma_в = \gamma_{ад} + \delta_м$ – сумарна зведена похибка в кінці діапазону вимірювань (рис. 1.16, а); $\gamma_н = \gamma_{ад}$ – зведена похибка на початку діапазону вимірювань.

Такі форми смуг похибок, а отже, й описані вище властивості мають високоточні потенціометри постійного струму, цифрові вольтметри та інші високоточні прилади, клас точності яких позначено не одним, а двома числами у вигляді умовного дробу $\gamma_в / \gamma_н = (\gamma_{ад} + \delta_м) / \gamma_{ад}$. У чисельнику такого дробу вказують зведену похибку $\gamma_в$ у точці верхньої границі вимірювання, тобто для $X = X_в$, а в знаменнику – зведену похибку $\gamma_н$ у точці нижньої границі вимірювання, де $X=X_н$ (зазвичай $X_н = 0$).

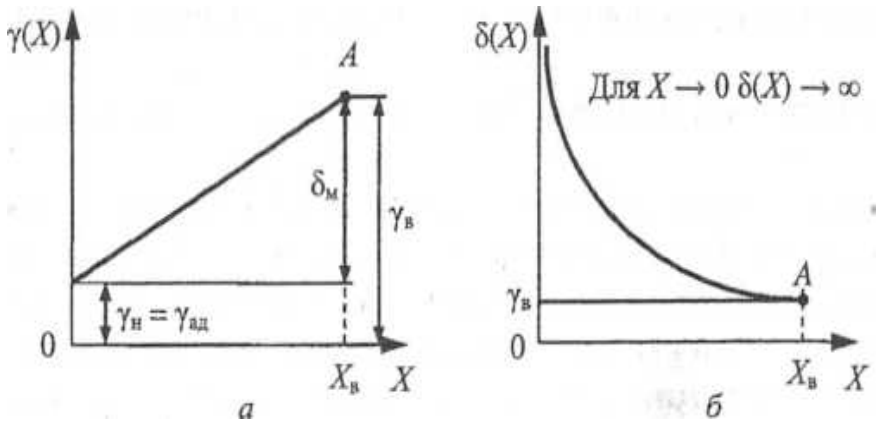


Рис. 1.16. Характер формування похибок ЗВТ з одночасним урахуванням мультиплікативної та адитивної смуг похибок:

а – зведеної; *б* – відносної

Таким чином, зведена похибка таких ЗВ лінійно зростає від $\gamma_н$ на початку діапазону вимірювань, до $\gamma_в$ в кінці діапазону.

1.2.5. Засоби вимірювальної техніки в рамках Державної системи приладів і засобів автоматизації

Велика різноманітність первинних перетворювачів з фізично неоднорідними вихідними сигналами (термо-ЕРС, зміна опору, деформація, кутове переміщення тощо) потребує значної номенклатури вимірювальних приладів, що ускладнює їх експлуатацію та ремонт. Окрім того, запровадження у виробництво потребує різноманітних перетворювачів, котрі б здійснювали перетворення різнорідних фізичних величин в єдину величину, наприклад, для узгодження сигналів вимірювальних каналів із входами ЕОМ.

Уніфікація вхідних і вихідних сигналів засобів вимірювань відкриває широкі перспективи застосування засобів обчислювальної техніки. Без неї це просто неможливо. Створення уніфікованих засобів вимірювань реалізується в рамках Державної системи приладів і засобів автоматизації (ДСП), яка є сукупністю нормалізованих рядів уніфікованих блоків, приладів та вузлів, складених з мінімальної кількості модулів, на основі яких складають будь-який прилад, що входить до ДСП.

На ранніх етапах створення засобів автоматизації і керування в різних організаціях і на підприємствах розроблялася безліч різних приладів вимірювання і контролю з схожими технічними характеристиками, проте при цьому не враховувалася можливість спільної роботи приладів різних виробників. Це призводило до збільшення вартості розробок складних систем і гальмувало широке впровадження засобів автоматизації. Тому в 1960 р. було ухвалено рішення про створення Державной системи промислових приладів і засобів автоматизації, а з 1961 р. розпочалися роботи по її реалізації.

Нині ДСП являє собою експлуатаційно, інформаційно, енергетично, метрологічно і конструктивно організовану сукупність виробів, призначених для використання як засобів автоматичних і автоматизованих систем контролю, регулювання і управління технологічних процесів, а також інформаційно-вимірювальних систем.

Технічні засоби ДСП будуються за блоково-модульним принципом з використанням сучасної технології виготовлення. Пристрої ДСП об'єднуються у взаємозв'язані комплекси технічних засобів (КТЗ), у кожного з яких своє специфічне призначення і свої сфери застосування. Комплекси мають метрологічну, інформаційну, конструктивну і експлуатаційну сумісність.

Всі агрегатні комплекси технічних засобів , що входять до ДСП, розроблялися з дотриманням ряду державних загальносоюзних стандартів, що регламентують вимоги до загальних технічних характеристик (точності, швидкодії, надійності, кліматичним умовам роботи), нормують параметри вхідних і вихідних сигналів, що уніфікують елементи конструкцій і т. д.

При створенні ДСП мета полягала в тому, щоб створити обмежену номенклатуру уніфікованих пристроїв, необхідних для побудови КТЗ різного призначення. В основу побудови ДСП лягли такі стандартизовані принципи і методи:

– уніфікації сигналів, інтерфейсів, конструкцій, модулів і блоків;

типізація і мінімізація різноманіття функцій автоматичного контролю, регулювання і керування; мінімізація номенклатури технічних засобів;

– блоково-модульна побудова приладів і пристроїв;

агрегатна побудова систем керування на базі уніфікованих приладів і пристроїв;

– сумісність приладів і пристроїв;

– формування гнучких, програмованих і перебудовуваних компонентів системи;

– реалізації у виробах раціональних естетичних і ергономічних вимог.

Мінімізація номенклатури виробів реалізується на основі двох принципів:

– уніфікації пристроїв одного функціонального призначення на основі параметричного ряду цих виробів;

– агрегатування комплексу технічних засобів для вирішення крупних функціональних завдань.

Структура технічних засобів ДСП може бути представлена діаграмою для п'яти груп виробів, розташованих на чотирьох рівнях (рис. 1.17).

На нижньому (*першому*) *рівні* знаходяться засоби, що виконують функції отримання інформації і дії на процес; ці засоби безпосередньо взаємодіють з об'єктом управління. Вони забезпечують інформацією усі вищерозташовані на схемі пристро і здійснюють передачу дій, що управляють, від будь-якого з них на об'єкт керування. Вимірювання параметрів, які не пов'язані із складними інструментальними методиками, здійснюється за допомогою давачів, конструктивно-технічні характеристики яких утворюють параметричні ряди. Для проведення вимірювань, що вимагають складних інструментальних методик, застосовуються пристрої, що входять в агрегатні комплекси (АК).

На другому рівні розташовані засоби для локального контролю і автоматизації, призначені для побудови одноконтурних систем контролю і управління (регулювання) простих об'єктів або автономного контролю і управлін-

ня (регулювання) окремих параметрів складних об'єктів. Ці вироби, як правило, випускаються у складі параметричних рядів і уніфікованих комплексів (УК), що створюються на основі базової моделі.

На третьому рівні знаходяться пристрої для централізованого контролю і управління, які використовуються у складі систем, що включають керуючі обчислювальні комплекси (КОК).

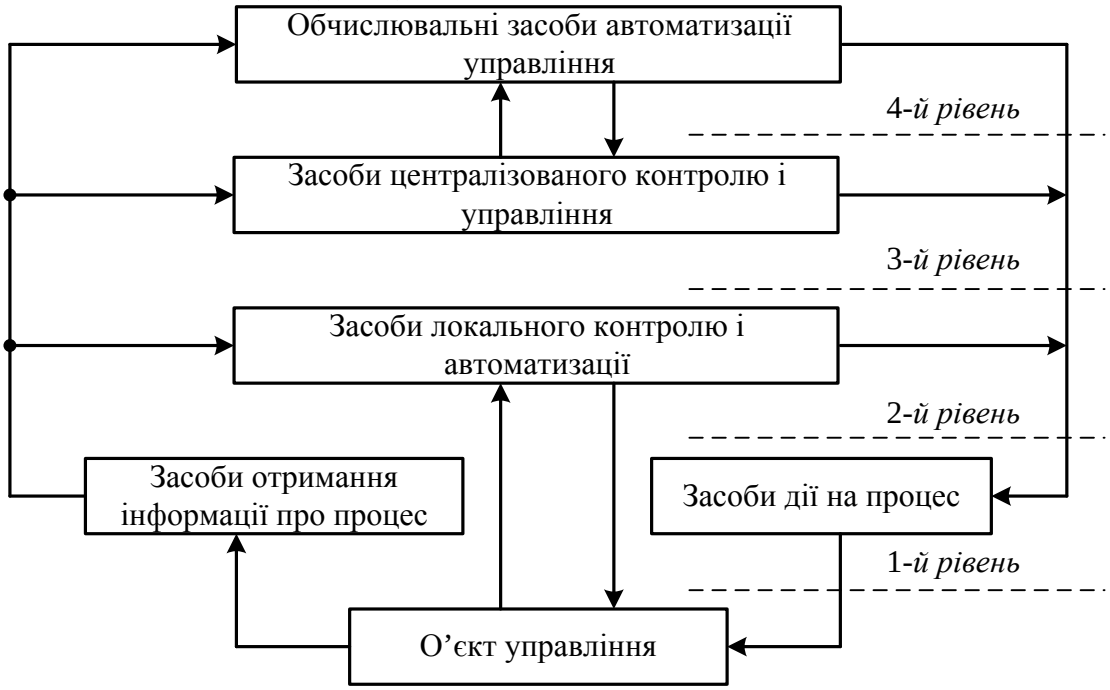


Рис. 1.17. Структура технічних засобів ДСП

Технічні засоби цієї групи призначені дня побудови автоматизованих систем управління технологічними процесами на об'єктах, що мають до декількох сотень контрольованих і регульованих параметрів. Вони дозволяють реалізувати багатозв'язкове і каскадне регулювання, непрямі вимірювання, багатоступінчатий захист і логічні операції при автоматичному пуску і зупинці об'єкту, перебудову алгоритму управління під час роботи, реалізацію елементарних математичних операцій.

На верхньому (*четвертому*) *рівні* розташовані обчислювальні засоби автоматизації управління, призначені для побудови КОК, які дозволяють здійснювати обробку великих масивів інформації (від тисяч контрольованих параметрів), реалізувати складні алгоритми управління об'єктом, зокрема супервізорне і безпосереднє цифрове управління, вирішення оптимізаційних, планово-економічних і обліково-статистичних завдань.

При конструюванні пристроїв ДСП прийнятий блоково-модульний принцип побудови виробів, який полягає в тому, що різні функціонально складніші пристрої ДСП створюються з обмеженого числа простіших стандартизованих блоків і модулів.

Застосування принципу блоково-модульної побудови поширюється не тільки на різні функціональні блоки, проміжні перетворювачі, вторинні прилади тощо, але й на створення ПВП. Це зумовлено тим, що велика кількість технологічних параметрів, таких, як тиск, витрата, густина,

в’язкість, температура, рівень тощо, легко та з достатньою для практики точністю перетворюються в зусилля чи лінійне (кутове) переміщення. Для перетворення технологічного параметра в силу чи лінійне (кутове) переміщення розроблено методи й засоби вимірювань (їх докладно розглянуто раніше).

Перетворення сили в уніфікований пневматичний чи електричний сигнали здійснюють перетворювачі, робота яких ґрунтується на принципі компенсації сил. Поширення набули також перетворювачі, за допомогою яких сила перетворюється в пневматичний сигнал – перетворювачі «сила – тиск» та «сила – струм», за допомогою яких сила перетворюється в уніфікований сигнал постійного струму. Зазначені перетворювачі іноді відповідно називають пневмосиловими та електросиловими.

Перетворювачі «сила – тиск», «сила – струм» і «переміщення – струм» являють собою модулі, використання яких забезпечує взаємозамінність ПВП у цілому й окремих його вузлів.

Застосування цього принципу при побудові виробів ДСП робить прилади універсальними, дозволяє використовувати при їх створенні раціональний мінімум конструктивних елементів (скорочується номенклатура деталей), забезпечує взаємозамінюваність приладів в цілому і окремих їх вузлів. При цьому також значно спрощуються і здешевлюються процеси ремонту приладів, які в більшості випадків зводяться до заміни типових вузлів і модулів, що вийшли з ладу. Реалізація блоково-модульного принципу дозволяє створювати нові засоби вимірювання і регулювання з вже існуючого відпрацьованого набору вузлів і блоків, що дає суттєвий економічний ефект і прискорює терміни розробки і впровадження нових виробів.

Номенклатура технічних засобів ДСП нараховує нині понад 2 тис. типів виробів, 30 % з яких складають давачі різних фізичних величин і технологічних параметрів.

У міру нарощування складності функцій діючих систем управління і розширення сфери їх застосування, що охоплює нові виробництва, номенклатура технічних засобів ДСП, і передусім давачів, традиційно збільшувалася. Тому найважливішою метою вдосконалення номенклатури є її раціональна мінімізація. Одним з основних методів скорочення числа виробів до доцільного мінімуму є розробка параметричних рядів виробів на базі системи переважних чисел.

Параметричний ряд – сукупність виробів однакового функціонального призначення, що мають одні і ті ж основні параметри, для яких зміна значень головного параметра при переході від попереднього числа ряду до подальшого підкоряється певним закономірностям. Першими параметричними рядами в ДСП за системою переважних чисел з'явилися ряди уніфікованих пневматичних і електричних давачів.

Методика побудови параметричного ряду виробів ДСП включає відбір основних параметрів приладів і пристроїв, що підлягають регламентації, виділення головного параметра з їх числа і встановлення найбільш раціональ-

ного розмірного ряду приладів по головному параметру. При цьому переважно застосовуються ряди, побудовані на основі геометричної прогресії, з числовими значеннями, відповідними ГОСТ 8032-56 «Переважних чисел і ряди переважних чисел». Е10, Е5, Е1.

Нині розроблені параметричні ряди давачів тиску, витрати, рівня, температури і приладів електровимірювань. Проте триває їх оптимізація за техніко-економічними показниками, наприклад, за критерієм мінімума сумарних витрат на задоволення заданих потреб. Цей критерій заснований на протиріччі між інтересами споживача і виробника: чим менше у ряді приладів, тим менше витрати на їх розробку і освоєння, і тим більшими партіями вони випускаються, що також знижує витрати виробника. Збільшення кількості приладів в ряду дає економію споживачеві за рахунок ефективнішого використання їх можливостей або точнішого дотримання режимів технологічних процесів.

Агрегатні комплекси (АК) є сукупністю технічних засобів, організованих у вигляді функціонально-параметричних рядів, що охоплюють необхідні діапазони вимірювання в різних умовах експлуатації і що забезпечують виконання всіх функцій в межах заданого класу завдань.

Принцип агрегатування в ДСП застосовують дуже широко. Уніфікована базова конструкція давачів теплоенергетичних величин з уніфікованими пневматичним і електричним сигналами була створена всього з 600 найменувань деталей, при цьому було отримано 136 типів і 863 модифікації цих давачів.

Закладені в ДСП загальні для всіх виробів поняття сумісності можна сформулювати таким чином.

Інформаційна сумісність – сукупність стандартизованих характеристик, що забезпечують узгодженість сигналів зв'язку за видами і номенклатурою, їх інформативними параметрами, рівнями, просторово-часовими і логічними співвідношеннями і типами логіки. Для всіх виробів ДСП прийняті уніфіковані сигнали зв'язку і єдині інтерфейси, які є сукупністю програмних і апаратних засобів, що забезпечують взаємодію пристроїв в системі.

Конструктивна сумісність – сукупність властивостей, що забезпечують узгодженість конструктивних параметрів і механічне сполучення технічних засобів, а також виконання ергономічних норм і естетичних вимог при сумісному використанні.

Експлуатаційна сумісність – сукупність властивостей, забезпечуючу працездатність і надійність функціонування технічних засобів при сумісному використанні у виробничих умовах, а також зручність обслуговування, налаштування і ремонту.

Метрологічна сумісність – сукупність вибраних метрологічних характеристик і властивостей засобів вимірювань, що забезпечують зіставність результатів вимірювань і можливість розрахунку погрішності результатів вимірювань при роботі технічних засобів у складі систем.

За функціональною ознакою вироби ДСП – ГОСТ 12997-76 поділяють на чотири групи (рис. 1.18):

– технічні засоби для отримання нормованої вимірювальної інформації про стан процесу або об'єкту;

– технічні засоби для прийому, перетворення і передачі інформації по каналах зв'язку;

– технічні засоби для перетворення, зберігання і оброблення інформації, формування команд управління;

– технічні засоби для використання командної інформації з метою впливу на об’єкт керування чи на технологічний процес або подання її оператору.

У *першу групу* технічних засобів залежно від способу представлення інформації входять: давачі; нормуючі перетворювачі, що формують уніфікований сигнал зв'язку; прилади, що забезпечують представлення вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем, і технічні засоби алфавітно-цифрової інформації, що вводиться оператором уручну.

Друга група технічних засобів містить комутатори вимірювальних ланцюгів, перетворювачі сигналів і кодів, шифратори і дешифратори, що узгоджують пристрої, засоби телесигналізації, телевимірювання і телекерування. Ці технічні засоби використовують для перетворення як вимірювальних, так і керуючих сигналів.

Третю групу складають аналізатори сигналів, функціональні і операційні перетворювачі, логічні пристрої і пристрої пам'яті, задавачі, регулятори, обчислювальні керуючі пристрої і комплекси.

У *четверту групу* входять виконавчі пристрої (електричні, пневматичні, гідравлічні або комбіновані виконавчі механізми), підсилювачі потужності, допоміжні пристрої до них, а також пристрої представлення інформації.

Усередині кожної групи визначені підгрупи з типовим набором функцій. Наприклад, підгрупа давачів температури, підгрупа давачів тиску, підгрупа двигунів постійного струму, підгрупи асинхронних двигунів і т. д. Кількість підгруп не була зафіксована і постійно зростало.

За родом використовуваної енергії носія інформаційних сигналів технічні засоби ДСП діляться на електричних, пневматичних, гідравлічних, а також пристрої, що працюють без використання допоміжної енергії. Для того, щоб забезпечити спільну роботу пристроїв різних груп, застосовують відповідні перетворювачі сигналів. В АСК ТП найбільш ефективне комбіноване застосування технічних засобів різних типів.

Пневматичні засоби автоматизації характеризуються великими функціональними можливостями, простотою конструкції, безпекою, високою надійністю та можливістю використання у важких умовах експлуатації. Джерелом зовнішньої енергії в пневматичних засобах автоматизації є стиснуте повітря до 140 кПа, а енергетичним носієм інформації є стандартний пневматичний сигнал 20…100 кПа.

Засоби пневмоавтоматики і вторинні прилади широко використовуються у хімічній, нафтопереробній, газовій, харчовій та інших галузях промисловості.

Промисловістю випускається широка номенклатура пневматичних давачів, перетворювачів, регуляторів, приладів контролю та реєстрації, що дає змогу на їх базі розробити системи автоматичного контролю та керування будь-якими складними технологічними процесами.

Основні вади пневматичних систем: інерційність, обмежена дальність передавання сигналів (не більше 300 м), а також підвищені вимоги до осушення та очищення стиснутого повітря. Їх можна використовувати для автоматизації технологічних процесів, для яких швидкодія засобів автоматизації не є вирішальним чинником.

Гідравлічні засоби автоматизації – це прилади і засоби, у яких джерелом зовнішньої енергії є стиснута рідина, а носієм інформації – гідравлічні сигнали. Робоча рідина (турбінне і трансформаторне мастила та вода), що є енергоносієм, перебуває під тиском від 0,16 до 6,4 МПа.

Гідравлічні засоби автоматизації забезпечують точні переміщення виконавчих механізмів при великих зусиллях. Ця гілка засобів менше поширена у промисловості.

Засоби гідроавтоматики і вторинні прилади широко використовуються у агропромисловому комплексі на мобільних сільськогосподарських об’єктах.

Електричні засоби автоматизації – це прилади і засоби автоматизації, у яких для живлення використовується зовнішня електрична енергія, а енергетичним носієм інформації є електричний сигнал. Електрична гілка розділяється на аналогову та дискретну гілки ДСП з відповідними стандартними уніфікованими сигналами. Найширшого використання набули електричні засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) зі струмовими сигналами 0…5 мА та 4…20 мА, а за напругою 0…10 В.

Електричні засоби автоматизації дозволяють вимірювати більшість параметрів, таких як температура, тиск, концентрація, вологість тощо, достатньо надійно і просто, забезпечуючи передавання вимірювальної інформації та командних сигналів на великі відстані.

Основні особливості електричних систем:

– у разі аварійного зникнення напруги регулювальні органи з електроприводом не змінюють свого положення, що сприяє скороченню наслідків аварії, у той час, як у пневматичних системах у разі аварійного падіння тиску повітря регулювальні органи переходять у крайнє положення, що може спричиняти розвиток аварії;

– просто передавати електричний сигнал на відстань;

– електричні системи мають малу інерційність, живлення цих засобів можна здійснювати від промислової електричної мережі;

– легко реалізувати зв'язок електричних систем з ЕОМ у той час, як для введення пневматичних сигналів в обчислювальну машину потрібно ставити спеціальні перетворювачі.

Комбіновані технічні засоби − це низка приладів і засобів різних типів ДСП, об'єднаних за допомогою перетворювачів, на базі яких розроблені системи автоматизації з урахуванням конкретних умов роботи та виробництва: висока волога, вибухонебезпечність, пожежонебезпечність, інерційність та ін.

Найчастіше використовуються пневматичні датчики з електричними приладами та ЕОМ за допомогою пневмоелектричних та електропневматичних перетворювачів.

Технічні засоби автоматизації, які працюють без стороннього джерела енергії, автономно, без приймання чи передавання зовнішніх інформаційних сигналів, а за рахунок енергії середовища, параметри якого вимірюються та регулюються − пристрої локальної дії, наприклад, регулятори прямої дії. Наприклад, регулювання рівнями температури, тиску та ін.

Державна система приладів і засобів автоматизації передбачає зведення вимірюваних параметрів (температури, тиску, концентрації тощо) в єдину форму інформації, зручну для передавання на відстань. У ДСП прийнято такі системи передавання: пневматичну, електричну струмову, електричну частотну та гідравлічну. Окрім цих систем, у практиці вимірювань застосовують реостатну, диференціально-трансформаторну, феромагнітну, сельсинну тощо (їх назви відповідають типу елемента, що здійснює перетворення «природного» сигналу – переміщення – в електричний сигнал).

Сигналом називається фізичний процес, властивості якого визначаються взаємодією між матеріальним об'єктом та засобом вимірювання. За своєю природою сигнали можуть бути: електричними, пневматичними, механічними тощо.

Сигнали – це сукупність потоків енергії або речовини, що надходять

або виходять із функціонального елементу АС або самої системи, збурюванні і керуючі дії, а також керований параметр.

Обмін інформацією між технічними засобами ДСП реалізується за допомогою сигналів зв'язку і інтерфейсів.

В АСК ТП найбільш поширені електричні сигнали зв'язку, перевагами, яких є висока швидкість передачі сигналу, низька вартість і доступність джерел енергії, простота прокладки ліній зв'язку. Пневматичні сигнали застосовують в основному в нафтовій, хімічній і нафтохімічній промисловості, де необхідно забезпечити вибухобезпечність і не потрібна висока швидкодія. Гідравлічні сигнали в основному застосовують в гідравлічних стежачих системах і пристроях керування гідравлічними виконавчими механізмами.

Інформаційні сигнали можуть бути представлені в природному або уніфікованому вигляді.

Природним сигналом називається сигнал первинного вимірювального перетворювача, вигляд і діапазон зміни якого визначаються його фізичними властивостями і діапазоном зміни вимірюваної величини. Звичайно це вихідні сигнали первинних вимірювальних перетворювачів, найчастіше електричні, які можна передати на невелику відстань (до декількох метрів). ВП з

природним вихідним сигналом (термопари, терморезистори, тензодавачі і ін.) широко застосовують при автоматизації простих об'єктів.

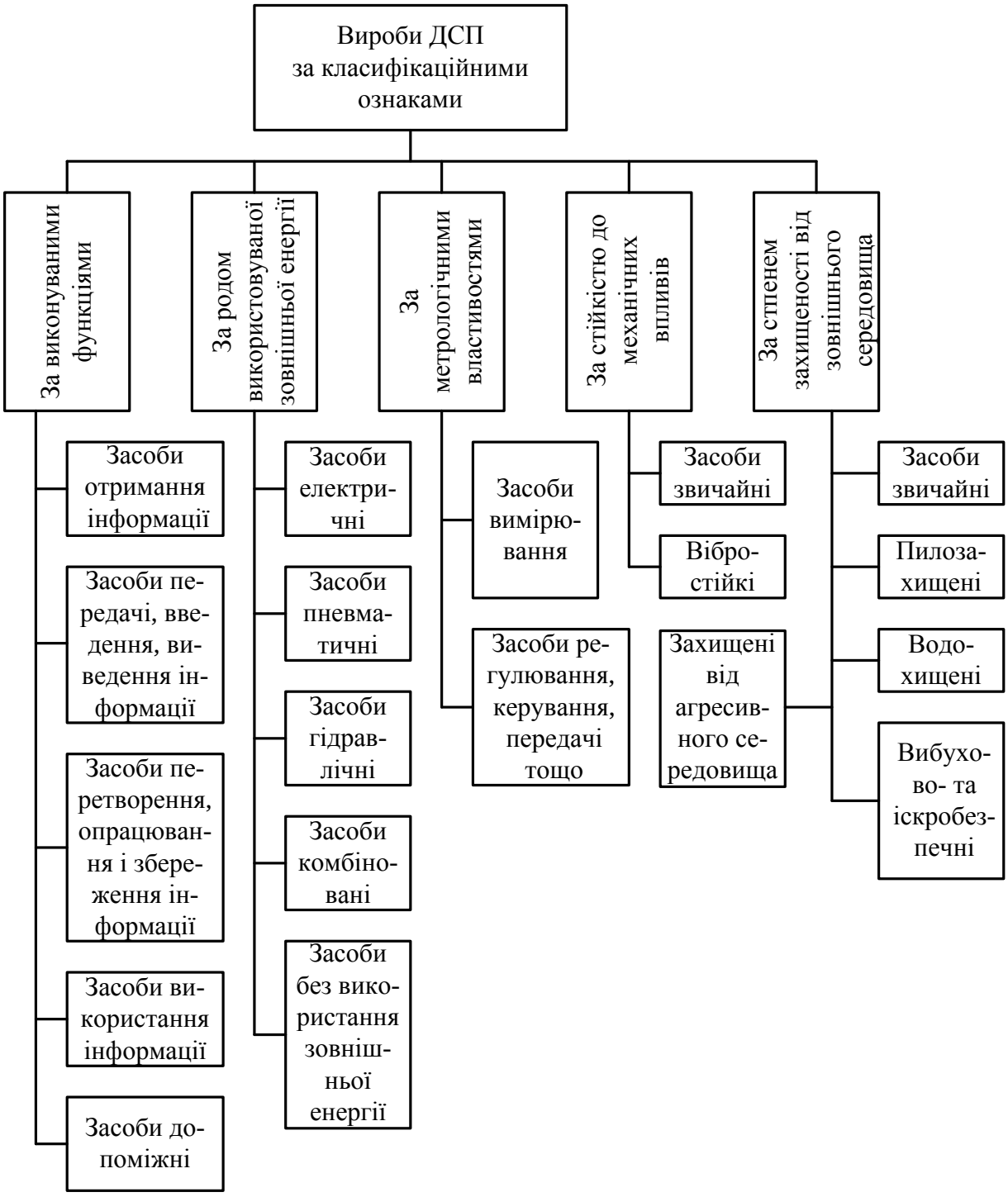


Рис. 1.18. Класифікація виробів ДСП

У ДСП прийнято десять типів природних вихідних сигналів: переміщення; кут повороту; зусилля; інтервал часу; напруга постійна; напруга змінна; опір активний; опір комплексний; ємкість електрична; частота.

Уніфікований сигнал – це сигнал певної фізичної природи, що змінюється в певних фіксованих межах незалежно від вигляду вимірюваної величини, методу і діапазону її вимірювання.

Вид носія інформації і діапазон зміни *уніфікованого сигналу* не залежать від вимірюваної величини і методу вимірювання. Зазвичай уніфікований сигнал отримують з природного за допомогою вбудованих або зовнішніх нормуючих перетворювачів.

Уніфікація сигналів вимірювальної інформації забезпечує гарантований зв'язок між засобами контролю і керування, передачу і обмін інформацією, а також дистанційний зв'язок між пристроями автоматики. На рис. 1.19 подано класифікацію основних уніфікованих інформаційних сигналів ДСП.

Серед електричних сигналів найбільшого поширення набули уніфіковані сигнали постійного струму (0…5 мА; 4…20 мА) і напруги (0…10 мВ; 0…100 мВ; 0…10 В), пневматичні (20…100 кПа) та частотні (4…8 кГц) сигнали. Вони використовуються як для передачі інформації від первинних перетворювачів до засобів контролю і керування, а від них до виконавчих механізмів, так і для обміну інформацією між окремими функціонально пов'язаними пристроями системи керування.

Меншою мірою використовуються уніфіковані інформаційні сигнали змінної напруги та частотні. Частотні сигнали в основному застосовуються у телемеханічних системах та спеціалізованих технічних комплексах.

Крім того, вироби ДСП класифікуються за ***метрологічними властивостями*** стійкості до механічних дій та захищеності від зовнішнього середовища.

Вибір засобів автоматизації за родом використовуваної допоміжної енергії (електричної, пневматичної або гідравлічної) визначається умовами пожежо- і вибухонебезпечності об'єкта, що автоматизується, агресивності та забруднення навколишнього середовища, вимогами до швидкодії та дальності передачі сигналів інформації і керування, іншими чинниками.

У технічній документації широко використовується така класифікаційна ознака, як *тип виробу* – сукупність виробів однакового функціонального призначення і принципу дії, схожих за конструктивним виконанням і які мають однакові головні параметри. До складу одного типу може входити декілька типорозмерів і модифікацій або виконань виробу. *Типорозміри* виробу одного типу розрізняються значеннями головного параметра (зазвичай виділяються для однофункціональних виробів).

Модифікація – сукупність виробів одного типу, що мають визначені конструкційні особливості або певне значення неголовного параметра. Під *виконанням* зазвичай розуміють вироби одного типу, що мають певні конструктивні особливості, які впливають на їх експлуатаційні характеристики, наприклад тропічне або морське.

Комплекс – крупніше класифікаційне угрупування, ніж тип. У ДСП комплекси розділяються на уніфікованих і агрегатних. Відмітною особливістю ***уніфікованого комплексу*** є те, що будь які поєднання його технічних засобів між собою не призводять до реалізації цими засобами нових функцій.

У ***агрегатних комплексах*** різним поєднанням технічних засобів можна реалізувати нові функції. Найширше використовуються агрегатні комплекси

засобів електровимірюваної техніки, обчислювальної техніки, телемеханіки, збору первинної інформації і ін.

Класифікація виробів ДСП наведена відповідно до стандартів ДСП, до складу яких входять понад 140 державних і 52 галузевих. Стандарти ґрунтуються на загальній методології і складені за принципами ієрархічної підпорядкованості стандартів нижчих рівнів вищим.

Для забезпечення сумісності елементів системи і розширення своєї участі на ринку кожна фірма-виготовляч, що випускає комплекс або окремі компоненти устаткування зобов'язана враховувати стандарти, що існують в цій області.

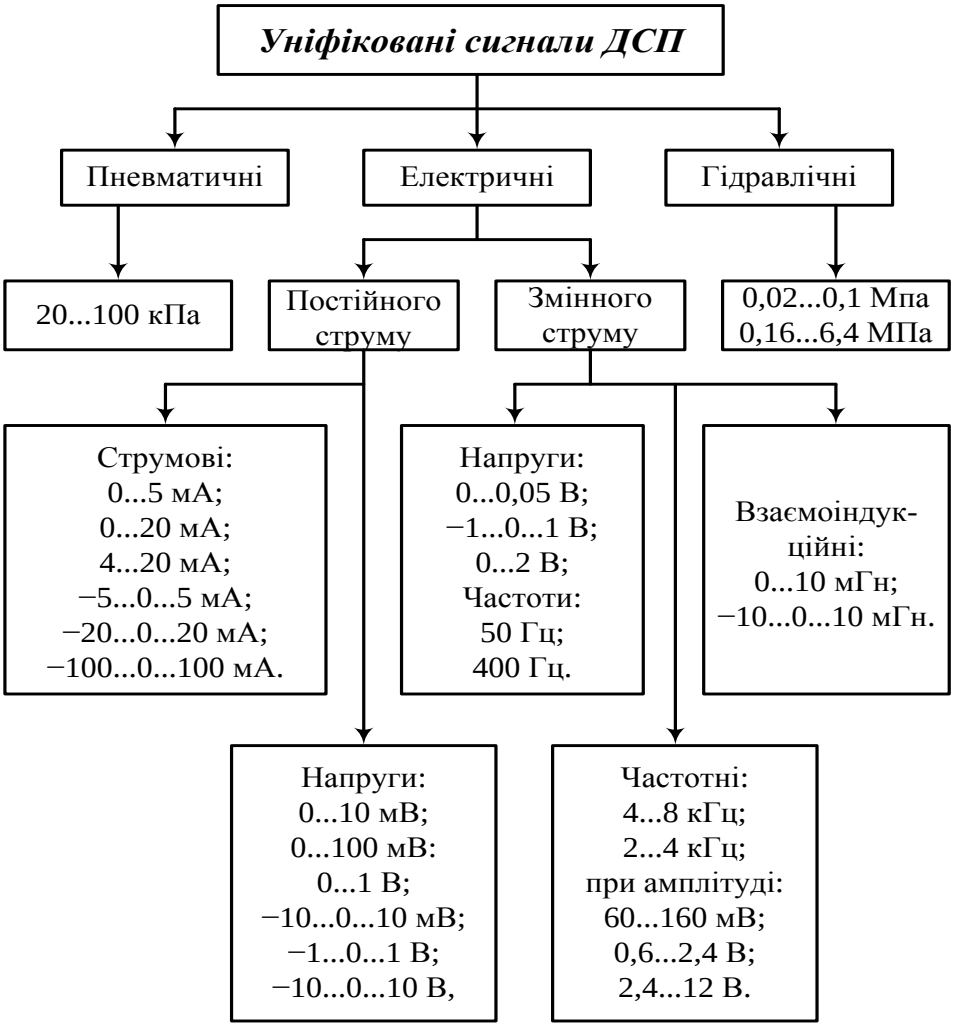


Рис. 1.19. Класифікація уніфікованих інформаційних сигналів ДСП

1.3. Основні відомості про системи автоматичного контролю

Автоматичний контроль найдавніший і водночас найважливіший вид автоматизації – саме зі створення та застосування в технологічних процесах систем автоматичного контролю, власне, й розпочався розвиток автоматизації.

Системи автоматичного контролю забезпечують швидкі та точні вимірювання потрібних технологічних параметрів: температури, тиску, рівня, витрати, якісних параметрів (фізико-хімічних властивостей) проміжних продуктів і, що особливо важливо, параметрів якості готової продукції.

1.3.1. Класифікація систем автоматичного контролю

Схема автоматичного контролю має в своєму складі щонайменше два засоби вимірювання, з'єднані між собою лінією (каналом) зв'язку, наприклад, термопару, підключену до мілівольметра. Один з них – первинний вимірювальний перетворювач – сприймає вимірюваний фізичний параметр X_i об'єкта автоматизації і слугує для перетворення вимірюваного параметра X_i в інший фізичний параметр – сигнал, який зручно передавати лініями зв'язку (наприклад, електричний струм, тиск стисненого повітря і т. ін.). Другий засіб вимірювання (його називають *вторинним* приладом, вважаючи, що всі перетворювачі, від яких він отримує інформаційні сигнали, є відносно нього первинними) вимірює сигнал, що надходить на його вхід із ліній зв'язку та несе інформацію про значення вимірюваного параметра. Вторинний прилад подає вимірювальну інформацію у формі, зручній для візуального сприйняття людиною-оператором.

Спостерігаючи за показаннями вторинного приладу та знаючи встановлену норму для значення вимірюваного параметра (допустимі відхилення часто наносять безпосередньо на шкалу вторинного приладу аналогового типу), оператор може здійснювати контроль, а в разі потреби – й ручне керування об'єктом автоматизації.

За кількістю наявних вимірювальних каналів розрізняють *одно-* та *багатоканальні* системи автоматичного контролю. Спрощену схему одноканальної системи автоматичного контролю показано на рис. 1.20 (курсивом показано приклади можливих варіантів застосування відповідних ЗВТ).

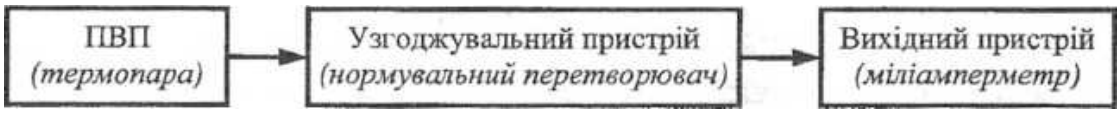


Рис. 1.20. Структурна схема одноканальної системи передавання вимірювальної інформації

Залежно від форми подання вимірювальної інформації системи автоматичного контролю поділяють на *показувальні, реєструвальні* та *сигналізувальні.*

У перших з них вимірювальна інформація виводиться на показувальні прилади і відображає тільки миттєві значення контрольованих параметрів. До складу реєєструвальної системи автоматичного контролю вводяться реєструвальні (самописні) прилади, що забезпечують запис динаміки змінювання технологічних параметрів у часі. Це дозволяє надалі відновити хід проходження технологічного процесу. Наявність у складі системи автоматичного контролю пристроїв сигналізації забезпечує автоматичне оповіщення персоналу − поданням світлових або звукових сигналів − про відхилення контрольованих параметрів за допустимі межі. Це відчутно спрощує роботу оператора.

Залежно від призначення та складу технічних засобів система автоматичного контролю може забезпечувати одночасну реалізацію всіх названих функцій.

В умовах автоматизованого контролю функції людини зводяться до виявлення відхилення контрольованого параметра від його заданого значення, вироблення рішення щодо зміни технологічного режиму та реалізації цього рішення на технологічному об'єкті керування зміною положення регулювальних органів на відповідних технологічних трубопроводах.

1.3.2. Структурні схеми систем автоматичного контролю

Застосування систем автоматичного контролю характерно для початкового етапу розвитку автоматизації, коли кількість технологічних апаратів і вимірюваних параметрів була невеликою. З розвитком технологій нафтопереробної, нафтохімічної, хімічної й інших галузей промисловості кількість апаратів, використовуваних у технологічному процесі швидко збільшувалася, а самі процеси ускладнювались. Ручне регулювання замінено на автоматичне, здійснюване складними системами автоматичного керування, однак ефективне функціонування цих систем неможливе без точної вимірювальної інформації, отримуваної від вимірювальних систем. В автоматизованих виробництвах такі системи працюють в автоматичному режимі; їх називають системами автоматичного контролю.

Розглянемо схему системи автоматичного контролю, що складається з об'єкта контролю, окремих вимірювальних каналів, інших вимірювальних пристроїв і забезпечує одночасне вимірювання та реєстрацію всіх контрольованих параметрів об'єкта вимірювання (рис. 1.21). У ній вимірювальна інформація про стан об'єкта вимірювання за значенням вимірюваних параметрів у кожному вимірювальному каналі формується за допомогою ПВП і посилається у вигляді відповідних – електричних або пневматичних – сигналів у лінії зв'язку.

Найпростішу структуру вимірювального каналу, що включає три складові – ПВП 1, лінію зв'язку 4.1 і вторинний прилад 5 – показано на рис. 1.21 (вимірювальний канал I). Прикладом технічної реалізації такого вимірювального каналу може бути вимірювання температури за допомогою термоелектричного перетворювача та автоматичного потенціометра (при цьому лінію зв'язку 4.1 утворюватимуть подовжувальні або компенсаційні провідники – залежно від типу використаного термоелектричного перетворювача) чи вимірювання витрати за допомогою індукційного витратоміра, що складається з ПВП та вимірювального приладу (мілівольтметра).

Залежно від типу вимірюваної фізичної величини, принципу дії ПВП, виду його вихідного сигналу та відстані, на котру потрібно передати інформацію, до складу вимірювального каналу, окрім ПВП, можуть бути додані проміжний 2 та передавальний 3 перетворювачі. При цьому територіально проміжний перетворювач 2 можна розміщувати біля ПВП 1 на

об’єкті вимірювання (рис. 1.21, вимірювальний канал II) або в операторній біля вторинного приладу 5 (рис. 1.21, вимірювальний канал III), який вимірює сигнал, що надходить із лінії зв’язку, та перетворює його у форму, зручну для безпосереднього сприйняття людиною (візуальні сигнали виміряних значень контрольованих параметрів $X_{N_1 \ldots} X_{N_i}$).

Прикладом першого з них може бути вимірювання рівня рідини за допомогою буйкового рівнеміра. У ньому проміжний пневмосиловий перетворювач 2 розміщується безпосередньо над ПВП (буйком) 1, а вихідний уніфікований сигнал перетворювача $P_{вих}$ = 0,02... 1 МПа за допомогою пневмолінії зв’язку 4.3 (лінія зв’язку 4.2 тут механічна) подається на пневматичний вторинний прилад. У випадку ж вимірювання, наприклад, pH ЕРС, яка визначається різницею потенціалів вимірювального та порівняльного електродів, з виходу ПВП 1 pH-метра екранованим електрокабелем 4.4 надходить на розміщуваний на щиті в операторній проміжний перетворювач (електронний блок pH-метра) 2, вихідний уніфікований сигнал якого подається на автоматичний потенціометр або міліампеметр.

Подібне територіальне рознесення можна застосовувати й до передавальних перетворювачів 3. Наприклад, для вимірювання температури манометричним термометром без шкальний дифманометр, який зазвичай використовують для передавання пневмосигналу на велику відстань, залежно від умов застосування можна розміщувати або поблизу ПВП (термобалон манометричного термометра) 1 (рис. 1.21, вимірювальний канал IV), або віддалено від нього за допомогою лінії зв’язку 4.6 (трубка-капіляр завдовжки 60 м). Вихідний сигнал дифманометра лінією зв’язку 4.7 (зазвичай поліхлорвінілова пневмотрубка) надходить на пневматичний вторинний прилад 5.

Окрім уже названих технічних засобів, до складу вимірювальних каналів системи автоматичного контролю технологічних параметрів можуть включатись і різноманітні додаткові пристрої. Наприклад, для вимірювання витрати рідини або газу в трубопроводі за допомогою витратоміра змінного перепаду тиску (рис. 1.21, вимірювальний канал V) звужувальний пристрій (діафрагма чи сопло) 1 перетворює вимірювану витрату в перепад тиску, який лінією зв’язку 4.8 (пневматичною або гідравлічною) підводиться на вхід дифманометра *3*. Останній формує пропорційний вимірюваній витраті вихідний уніфікований сигнал і через лінію зв’язку 4.9 забезпечує дистанційне передавання вимірювальної інформації. Оскільки залежність між перепадом тиску на звужувальному пристрої та вимірюваною витратою квадратична, то для її лінеаризації вихідний сигнал дифманометра подається на пристрій добування квадратного кореня 6.

Для визначення кількості речовини, що перейшла трубопроводом за певний відтинок часу, додатково до вторинного приладу 5 використовують інтегратор 8 (він може бути вбудованим у прилад). Оскільки елементи 3-6 вимірювального каналу частіше належать до пневматичних технічних засобів, а інтегратор 8, навпаки, до електричних, то для їх узгодження використовують пневмоелектричний перетворювач 7. Відповідно до

вибраних типів згаданих ЗВТ та використаного вторинного приладу 5 добирають і види ліній зв'язку 4.10 – 4.12.

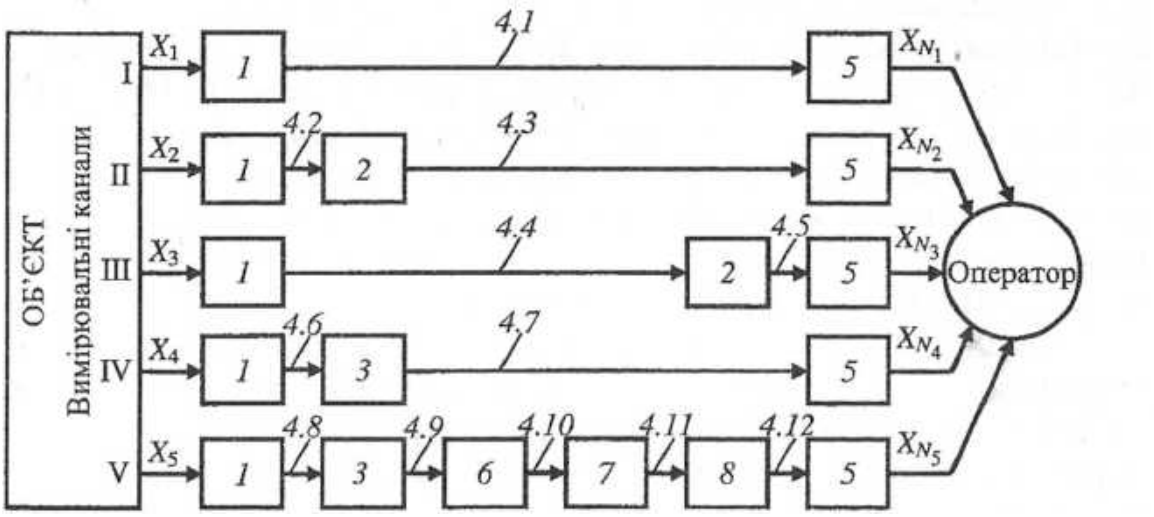


Рис. 1.21. Структурна схема багатоканальної системи автоматичного контролю з окремими вторинними приладами в кожному вимірювальному каналі:

1 – ПВП; 2 – проміжні вимірювальні перетворювачі; 3 – передавальні перетворювачі; 4 – лінії зв'язку; 5 – вторинні прилади; 6 – пристрій добування квадратного кореня; 7 – пневмоелектричний перетворювач; 8 – інтегратор

Варто зазначити, що сформована у вигляді уніфікованого сигналу – електричного чи пневматичного – вимірювальна інформація, окрім подавання її на вхід відповідного вторинного приладу 5, паралельно може спрямовуватися в ЕОМ (пневматичний сигнал необхідно заздалегідь перетворити в уніфікований електричний сигнал) або в систему автоматичного керування. Для цього знадобляться пневмоелектричні чи електропневматичні перетворювачі та відповідні лінії зв'язку.

Інший тип вимірювальної системи – система (рис. 1.22), яка забезпечує почергове підключення вимірювальних каналів до вторинного приладу 5 за допомогою комутатора 6.

Особливістю такої вимірювальної системи є також те, що вихідні сигнали перетворювачів усіх вимірюваних величин мають бути однаковими як за природою сигналу, так і за діапазоном вимірювань, тому що всі вони відображаються та реєструються одним і тим же вторинним приладом 5.

Для забезпечення уніфікації сигналів, які надходять від ПВП, або використовують ПВП з уніфікованим виходом, або додають до них спеціальні проміжні (нормувальні) перетворювачі.

З метою оптимізації приймання та оброблення сигналів вимірювальної інформації, розширення можливостей та поліпшення характеристик систем автоматичного контролю для керування їх роботою можна застосовувати МП чи мікро-ЕОМ.

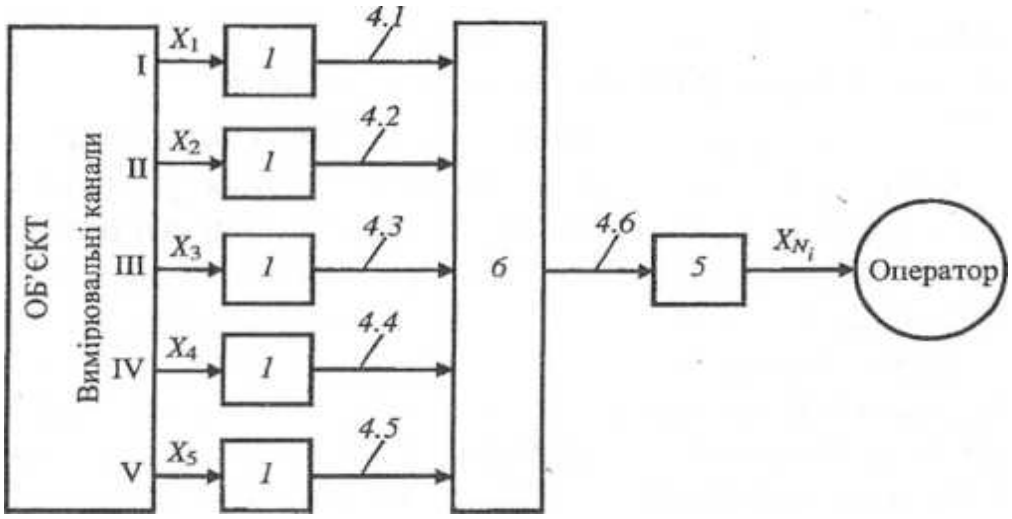


Рис. 1.22. Структурна схема багатоканальної системи автоматичного контролю з одним вторинним приладом

До складу такої системи, приклад структури якої показано на рис. 1.23, окрім вимірювальних каналів та комутатора, входять також програмовані підсилювачі, АЦП (у разі використання цифрових ПВП потреба в ланцюжку *комутатор – АЦП* відпадає), МП, інтерфейс та інші технічні засоби (їх більш детально розглянуто у восьмому розділі).

За аналогією розглянутої класифікації систем керування системи автоматичного контролю, структурні схеми яких показано на рис. 1.20 і 1.21, із певною часткою умовності можна назвати децентралізованою та централізованою.

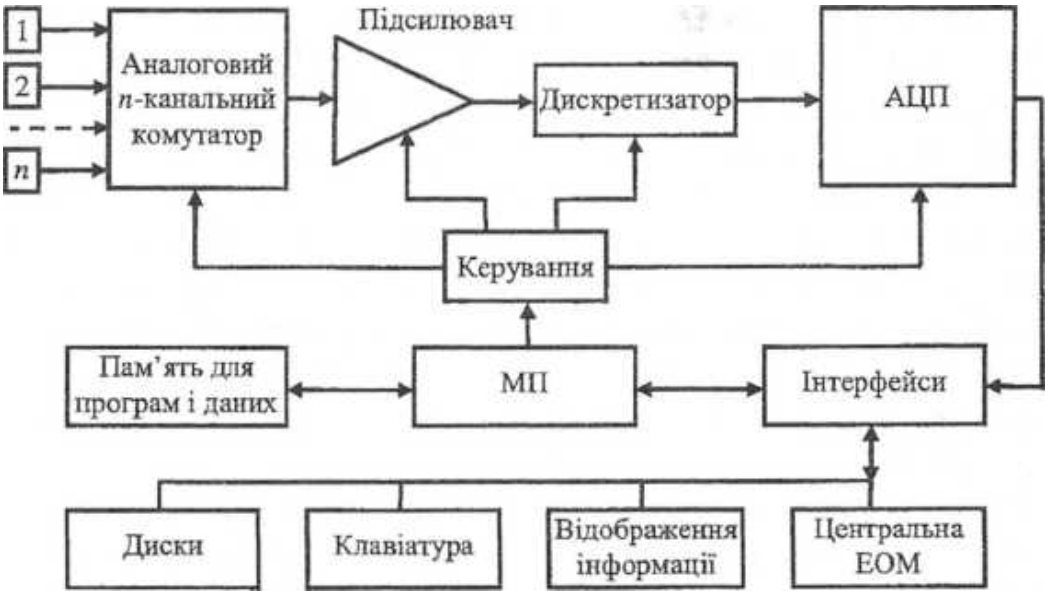


Рис. 1.23. Структурна схема багатоканальної системи автоматичного контролю, керованої МП

1.3.3. Датчик в системах автоматичного контролю та керування

Хоча згаданий термінологічний ДСТУ 2681-94 подає лише термін «первинний вимірювальний перетворювач», однак у практиці вимірювань продовжують широко застосовувати й більш давній термін «датчик» («давач»). Це пояснюється тим, що поняття **«датчик»** має більш широке значення (а сам термін «датчик» значно коротший, тому зручніший для використання), ніж поняття «первинний вимірювальний перетворювач», оскільки датчик включає загалом не тільки один первинний – чутливий перетворювальний елемент, а й інші елементи, що забезпечують йому більшу конструктивну та функціональну закінченість: вихідний сигнал датчика має бути уніфікованим (стандартним) за величиною та формою. Для цього метрологічні характеристики датчика нормують і визначають для певної сукупності засобів вимірювання. Так, термоелектричний перетворювач (ТП), побудований на основі відповідної термопари, безперечно, є первинним вимірювальним перетворювачем (а сильфон, посутньо, не ПВП, а лише його ЧЕ) у вимірювальному каналі системи автоматичного контролю чи регулювання температури, проте він не є датчиком температури, позаяк його вихідний сигнал не уніфікований – значення вихідної термо-ЕРС цього ТП буде визначатися номінальною статичною характеристикою, властивою термопарам відповідного градуювання.

Тому, якщо кілька ТП різних типів, робочі спаї яких розміщені у середовищі з однаковою температурою, підключити до мілівольтметрів з однаковим градуюванням, то всі вони, крім одного, градуювання якого відповідатиме номінальній статичній характеристиці саме підключеного до його входу ТП, покажуть різну температуру. А для того щоб отримати інформацію про вимірювану температуру у вигляді уніфікованого сигналу (наприклад, щоб подати її на вхід регулятора, мікроконтролера чи ЕОМ), тобто, щоб отримати повноцінний датчик температури, такий ТП слід додатково укомплектувати ще й відповідним нормувальним перетворювачем − у позначення тилу ТП з уніфікованим вихідним сигналом заводи-виробники додають літеру «У» (ТХАУ, ТХКУ, ТППУ тощо).

Хоча, на думку фахівців, термін «датчик» коректний, звичний і зручний для застосування, надалі, щоб уникнути неоднозначності тлумачень, використовуватимемо рекомендований ДСТУ 2681-94 термін «первинний вимірювальний перетворювач» й у значенні «датчик» (принагідно варто наголосити, що проблеми створення необхідного ПВП зазвичай неспівмірно більші, ніж подальше «підтягання» його до рівня повноцінного датчика). В останні роки поряд із терміном «датчик» дедалі ширше використовують також термін **«сенсор»** (від англ. *sense* – чуття, сприйняття), який ДСТУ 2681-94 подає як синонім саме ПВП.

Головні властивості ПВП як перетворювача такі:

– безпосередня взаємодія (передусім інформаційна) з об’єктом вимірювання;

– наявність входу та виходу;

– однонаправленість дії;

– наявність одного або кількох перетворювальних елементів, перший з яких – чутливий перетворювальний елемент;

– однозначний функціональний і не обов'язково лінійний (хоча лінійний завжди кращий, оскільки при цьому спрощується як сам ПВП, так і алгоритм оброблення інформації про вимірювану фізичну величину) зв'язок між вхідною перетворюваною фізичною величиною і вихідною фізичною величиною, яку часто називають також вихідним сигналом;

– наявність на вході інформативної фізичної величини (або кількох інформативних фізичних величин у багатофункціональному ПВП) і неінформативних фізичних величин;

– наявність нормованих метрологічних характеристик;

– конструктивна, схемотехнічна та функціональна закінченість;

– конструктивний, електричний та інформаційний зв'язки ПВП з іншими технічними засобами автоматичної системи завдяки забезпеченню відповідної сумісності ПВП з нею.

Значущість ПВП у системах автоматичного контролю та керування важко переоцінити – недарма серед фахівців з автоматизації віддавна укріпилась переконаність у тому, що проблеми автоматизації – це, власне, проблеми створення необхідних ПВП. Саме невирішеність цієї проблеми завадила завершити у повному обсязі зведення у 1970-1980 рр. грандіозної споруди автоматизованої системи керування (АСК) народногосподарським комплексом СРСР. Постали й запрацювали верхні поверхи споруди (АСК підприємств, галузей), тобто ті, на яких потрібну інформацію у величезні ЕОМ можна було вводити вручну, а от поставити АСК верхніх рівнів на надійний фундамент численних АСК технологічними процесами, які мали б опиратися на оперативну та достовірну інформацію про стан тисяч і тисяч технологічних об'єктів керування, що стала б надходити до керувальних ЕОМ від мільйонів різноманітних ПВП, так і не вдалося – саме через брак останніх.

1.4. Загальна класифікація первинних вимірювальних перетворювачів автоматичних систем

Різноманітність різних за фізичною природою об'єктів, на яких застосовують автоматичні системи, значна кількість та різномасштабність полів фізичних величин, які треба перетворювати за різних умов і на різних об'єктах, зумовили створення та використання різноманітних ПВП.

Класифікувати ПВП фізичних величин, як і засоби вимірювань у цілому, дуже важко, а то й неможливо через інтенсивний розвиток ПВП, як і засобів вимірювань взагалі. Класифікаційних ознак ПВП автоматичних систем може бути дуже багато. Нижче подано одну з можливих узагальнених класифікаційних схем ПВП [45], яка призначена для загального ознайомлення з ПВП, дає уявлення про їх різноманітність.

За функціональним призначенням ПВП автоматичних систем поділяють на індикаторні, вимірювальні та комбіновані.

Індикаторні ПВП, що простіші за схемами і конструкціями, призначені для контролю без складного оброблення інформації. До таких ПВП належать сенсори наявності диму, вогню, охоронної сигналізації тощо.

Вимірювальні перетворювачі складніші, ніж індикаторні; до них ставляться значно жорсткіші вимоги, особливо в царині метрологічних характеристик, зокрема щодо їх метрологічної надійності. Це пов'язано з тим, що вимірювальні ПВП використовують як складові частини засобів вимірювань (вимірювальних каналів інформаційних вимірювальних систем), разом з якими ПВП застосовують для вимірювань значень перетворюваних цими ПВП фізичних величин.

2. Оскільки перетворення, які відбуваються в ПВП, пов'язані з *витрачанням енергії*, їх можна поділити на дві великі групи:

– ПВП, які перетворюють енергію;

– ПВП, які керують енергетичними потоками (модулюють енергетичні потоки).

За видом перетворюваних фізичних величин ПВП поділяють на дві великі групи: ПВП електричних величин і ПВП неелектричних величин.

Первинні вимірювальні перетворювачі електричних величин призначені для перетворювання електричних величин – електричного струму, напруги електричного струму, напруженостей електричного та магнітного полів, магнітної індукції, потужності, частоти струму тощо.

Первинні вимірювальні перетворювачі неелектричних величин становлять переважну більшість сучасних ПВП. їх призначено для перетворювання фізичних величин неелектричної природи – концентрацій рідких, газових, сипких і твердих речовин, механічних, гідравлічних, оптичних, акустичних та інших величин, великої кількості величин, які характеризують стан об'єктів, якість сировини та продукції (наприклад, вологість, щільність, деформацію, твердість, шорсткість, тиск крові, частоту пульсу, температуру тіла людини тощо).

За кількістю виконуваних функцій (найчастіше це кількість перетворюваних ПВП фізичних величин) ПВП бувають однофункціональними та багатофункціональними.

Багатофункціональні ПВП почали розвиватися років 10 – 15 тому завдяки використанню в ПВП досягнень мікроелектронної та мікропроцесорної техніки. Цей процес прискорюється і тепер.

За кількістю перетворюваних компонентів поля перетворюваної фізичної величини ПВП поділяють на одно-, дво- та трикомпонентні.

За фізичним принципом дії ПВП бувають фізичні (електричні, магнітні, теплові, оптичні, акустичні тощо), хімічні та комбіновані (фізико-хімічні, електрохімічні, біоелектричні тощо). Принцип дії ПВП визначається насамперед тим, яка закономірність використана в чутливому перетворювальному елементі або в чутливих перетворювальних елементах багатоелементного ПВП − фізична чи хімічна. Однак є ПВП (наприклад,

механоелектричні), які не належать до якогось одного типу. їх називають *комбінованими ПВП.*

За видом перетворення фізичної величини ПВП поділяють на такі класи:

– прямого одноступеневого та багатоступеневого перетворень – перетворювана фізична величина перетворюється в іншу фізичну величину, якою є вихідний сигнал ПВП;

– непрямого перетворення – перетворювана фізична величина спочатку перетворюється в проміжну фізичну величину, а потім ця величина перетворюється у вихідний сигнал ПВП з використанням компенсаційного (зрівноважувального) методу;

– комбінованого типу – одночасно використовують пряме і непряме перетворювання фізичної величини або кількох фізичних величин (частіше це відбувається у багатофункціональних ПВП, у ПВП з автоматичним коригуванням похибок тощо).

Перетворення фізичних величин ПВП завжди пов'язане з витрачанням енергії і (або) матерії (речовини). Залежно від того, використовується чи не використовується у ПВП для перетворення значення фізичної величини зовнішнє основне джерело енергії, ПВП поділяють на *пасивні* або параметричні, *активні* або генераторні та *комбіновані.*

За здатністю розрізняти змінення фази або полярності вхідної фізичної величини ПВП поділяють на реверсивні та нереверсивні. Реверсивні ПВП чутливі до змін полярності перетворюваної величини. У нереверсивних ПВП вихідний сигнал не залежить від полярності перетворюваної величини.

За характером зміни вихідного сигналу ПВП поділяють на три групи:

– з аналоговим вихідним сигналом, що безперервно змінюється;

– з дискретним (наприклад, що імпульсно змінюється) вихідним сигналом;

– з кодовим вихідним сигналом.

При цьому вихідні сигнали ПВП можуть бути електричними, механічними, пневматичними, акустичними, оптичними тощо, що пов'язано з відповідно використовуваними в них фізичними принципами перетворення вхідних фізичних величин, призначеннями ПВП. Для побудови ПВП більш придатні класифікації ПВП за їх функціональним призначенням, видом і принципом перетворень фізичної величини, виглядом рівнянь, які описують процеси, що відбуваються в ПВП.

За виглядом математичних моделей, що описують їх. Одна з таких класифікацій передбачає поданий вище розподіл ПВП на *лінійні, лінеаризовані* та *нелінійні.*

За характером перетворення значень фізичних величин у часі ПВП поділяють на дві групи: ПВП безперервної дії та ПВП дискретної (циклічної) дії.

За характером взаємодії ПВП з об'єктом вони бувають стаціонарні та рухомі, контактні та безконтактні, просторово-розподілені, безперервні, дискретні, або багатоелементні та зосереджені, або одноелементні. Причому стаціонарні й рухомі, одноелементні та багатоелементні ПВП можуть бути як

контактними, так і безконтактними. Прикладом безперервного просторово-розподіленого ПВП є волоконно-оптичний ПВП.

Безконтактні (не мають механічного контакту з об’єктом, інформаційний контакт ПВП з об’єктом має бути завжди) ПВП можуть бути такими, що сприймають зовнішнє поле (наприклад, теплове, оптичне, акустичне, електромагнітне), а також такими, що випромінюють і сприймають відбите від об’єкта поле. Перші нерідко називають також пасивними, бо вони не діють на об’єкт своїм первісним полем, а другі – активними.

За просторовою вибірковістю ПВП поділяють на дві групи: ПВП спрямованої дії та ПВП неспрямованої дії. За цією ознакою ПВП спрямованої дії мають дещо спільне з ПВП, які перетворюють визначену кількість просторових компонентів поля перетворюваної фізичної величини.

Крім ПВП тривалої дії, інколи використовують ПВП одноразової дії. Є також ПВП із ЧЕ, які витрачаються без поновлювання, і з ЧЕ, які періодично можна поновлювати або регенерувати.

В останні роки швидко розвивається новий напрям у створенні ПВП – створення та використання *інтегральних* ПВП. Завдяки використанню мікроелектронної технології, мікропроцесорної техніки і чутливих перетворювальних елементів, побудованих на нових фізичних, хімічних, фізико-хімічних та біоелектронних принципах перетворення фізичних величин, такі ПВП виконують як один пристрій (часто досить малих розмірів). Застосування таких ПВП дало змогу значно спростити і підвищити надійність функціональних перетворювачів, увести додаткові сервісні та метрологічні характеристики (самотестування, автокалібрування, зовнішнє керування алгоритмом функціонування). Такі вимірювальні перетворювачі називають інтелектуальними.

Ці ПВП зазвичай не ремонтуються, а замінюються після закінчення встановленого терміну роботи або в разі відмови. В особливо відповідальних застосуваннях ПВП їх резервують.

1.4.1. Уніфікація і стандартизація вимірювальних перетворювачів

Ще один важливий напрям розвитку первинних перетворювачів – подальше вдосконалення первинних перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом, які набувають дедалі більшого поширення.

У вітчизняному приладобудуванні питання уніфікації і стандартизації вимірювальних перетворювачів розв'язуються у рамках Державної системи промислових приладів і засобів автоматизації. Для того, щоб створювати складні інформаційні системи (керуючі, вимірювальні), необхідно насамперед забезпечити інформаційну сумісність технічних засобів. З цією метою у рамках ДСП спочатку були уніфіковані, а потім і стандартизовані вихідні сигнали ВП (ГОСТ 26.010-83, 26.011-83, 26.013-83, 26.014-83).

За виглядом вихідних сигналів розрізняють вимірювальні перетворювачі з природним і уніфікованим вихідними сигналами. Перші є пристроями, у яких здійснюється первинне (зазвичай одноразове) перетворення вимірюваної фізичної величини. Природне формування сигналу тут

забезпечується методом перетворення і конструкцією ВП. Такі перетворювачі найчастіше застосовують в пристроях прямого регулювання або при централізованому контролі порівняно простих об'єктів.

При створенні відносно складних систем з використанням ЕОМ і необхідності передачі сигналів на великі відстані застосовують перетворювачі природних сигналів в уніфікованих. Для цих цілей розробляються спеціальні нормуючі перетворювачі

Під вимірювальним перетворювачем з уніфікованим вихідним сигналом розуміють первинний перетворювач та уніфікувальний перетворювач, які поєднані схемне, конструктивно й алгоритмічно для забезпечення уніфікації вихідного сигналу. При цьому уніфікацію здійснюють за такими основними характеристиками:

– інформативними параметрами (напругою, струмом, частотою, цифровим кодом тощо);

– робочим діапазоном (0...10 В; 0...100 мВ; 0...5 мА тощо);

– функціональною залежністю між значенням вимірюваної величини та значенням інформативного параметра вихідного сигналу (зазвичай ця залежність має бути лінійною).

Окрему групу складають перетворювачі з дискретним (релейним) вихідним сигналом, контактна група яких змінює своє положення досягши вимірюваної величиною заданого значення. Їх застосовують для позиційного регулювання і сигналізації.

Перетворювачі, що змінюють масштаб сигналу, називають *масштабними* ВП.

Для отримання уніфікованих аналогових сигналів застосовують *нормуючі* ВП.

Основні функції, які реалізує уніфікувальний перетворювач, можна розділити на лінійні (встановлення нуля, масштабування, компенсація температурних впливів тощо) та нелінійні (лінеаризація функції перетворення ПВП).

Сучасні технологічні процеси передбачають вимірювання великих масивів різних фізичних величин за допомогою різноманітних первинних перетворювачів. Розмаїття інформативних параметрів та робочих діапазонів їх значень значно ускладнюють побудову систем багатопараметричного контролю та керування технологічними процесами. Використання довгих ліній зв’язку між первинними перетворювачами і вторинними засобами вимірювання послаблює стійкість вимірювань до різноманітних зовнішніх чинників (насамперед електричних та електромагнітних завад).

Тому наразі розроблення вимірювальних перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом – це цілий напрям вимірювальної техніки, що набув значного розвитку за останні роки. Цьому сприяла поява нової елементної бази з мікроспоживанням, високим ступенем інтеграції, широким діапазоном робочих температур та високими метрологічними характеристиками. Здебільшого традиційні первинні перетворювачі розглядають не як

закінчений виріб, а як складову частину перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом.

Новий напрям розвитку вимірювальних перетворювачів передбачає використання уніфікованих цифрових вихідних сигналів і роботу з так званими віртуальними вторинними засобами вимірювання на базі персональних комп'ютерів. Такі вимірювальні перетворювачі здебільшого мають гнучкий алгоритм функціонування і дістали назву інтелектуальних.

Найбільш поширені уніфікувальні перетворювачі сигналів постіного струму і напруги. До таких сигналів, наприклад, належать вихідні сигнали термопар, мостових вимірювальних схем постійного струму, потенціометричних сенсорів, каліброваних шунтів тощо. Окрім того, такі уніфікувальні перетворювачі часто є елементами складніших засобів вимірювання і забезпечують необхідний рівень (і форму) вихідного сигналу.

Тепер переважають вимірювальні перетворювачі з цифровим уніфікованим сигналом. Насамперед це зумовлено високою стійкістю цифрового сигналу до зовнішніх впливів, можливістю безпосередньої роботи з персональними комп'ютерами, можливістю паралельної роботи багатьох вимірювальних перетворювачів на спільній лінії зв'язку.

1.4.2. Фізичні основи побудови первинних вимірювальних перетворювачів

У вимірювальних системах використовуються здебільшого електричні (значно рідше пневматичні, гідравлічні, оптичні тощо – і здебільшого як проміжні) сигнали у всьому ланцюжку – від вимірювання й до запису результатів, тому між досліджуваним об'єктом і вхідними пристроями вимірювальних систем завжди стоять вимірювальні перетворювачі типу *фізична величина – електричний сигнал.*

Електричний сигнал – це змінна складова струму або напруги, що несе інформацію, пов'язану з вимірюваною величиною; амплітуда й частота сигналу мають бути безпосередньо пов'язані з амплітудою й частотою вимірюваної величини. Електричні вихідні сигнали ПВП забезпечують широкі можливості для автоматизації вимірювань, керування технологічними процесами й обладнанням, технічними засобами наукового і вимірювального експерименту, безперервного виконання математичних операцій, пов'язаних з обробленням результатів вимірювань. Завдяки великому спектру частот і динамічному діапазону їх значень електричні сигнали забезпечують можливість перетворення як швидко – так і повільнозмінних фізичних величин.

Під дією вимірюваної фізичної величини x ПВП видає еквівалентний сигнал, що є функцією вимірюваної величини:

$$y = \varphi(x)$$

де y та x – відповідно вихідна та вхідна величини ПВП (рис. 1.24, *а*).

Вимірявши значення у, можна визначити значення x. Співвідношення

$y = \varphi(x)$ виражає в загальній теоретичній формі фізичні закони, покладені в основу функціонування ПВП: Будучи вираженими чисельно, ці закони зумовлюють вибір конструкцій (геометрії та розмірів) і матеріалів для їх виготовлення, допустимі характеристики довколишнього середовища, в яких можуть працювати ПВП, та умови застосування. Для всіх ПВП співвідношення $y = \varphi(x)$ у числовій формі визначають експериментально в результаті градуювання, за якого для деяких відомих значень x вимірюють відповідні значення y і будують градуювальну криву (рис. 1.24, *б*), з якої для всіх y_i, можна одержати відповідні значення x_i (рис. 1.24, *в*).

Найважливіша проблема у проектуванні та використанні ПВП – забезпечення сталості його чутливості, яка б щонайменше залежала від значень x (зумовлюючи лінійність характеристики перетворення) та частоти їх змін, від часу та впливу інших фізичних величин, що характеризують не сам об'єкт, а його оточення (їх називають *впливовими* величинами, тобто такими, що впливають на результати вимірювань).

Застосовують ПВП активного (генераторні), пасивного (параметричні) і комбінованого типів. Активні ПВП на виході видають заряд, напругу або струм, пропорційні вхідній величині, тобто вони є джерелом сигналу вимірювальної інформації. У пасивних ПВП пропорційно вхідній величині змінюються вихідний опір, індуктивність або ємність, тому параметричний ПВП має бути обов'язково ввімкненим у схему із зовнішнім джерелом живлення, а вимірювання здійснюється побічно, за змінюванням струму або напруги. Джерело електричного сигналу в цьому випадку – сукупність електричної схеми та пасивного ПВП.

Комбіновані ПВП використовують для вимірювання окремих неелектричних величин, які не вдається відразу перетворити в електричні. Це треба робити поетапно за допомогою двох перетворювачів. На першому етапі вихідну вимірювану величину перетворюють у проміжну неелектричну, на другому (за допомогою другого перетворювача) – у вихідну електричну. Сукупність цих двох перетворювачів і утворює комбінований ПВП. Наприклад, тиск можна вимірювати за допомогою мембрани, яка слугує первинним перетворювачем і деформація якої перетвориться в електричну величину перетворювачем (диференціально- трансформаторним, ємнісним, індуктивним тощо), який реагує на механічні зміщення.

Активні ПВП. Принцип дії активного ПВП ґрунтується на тому чи тому фізичному явищі, що забезпечує перетворення вимірюваної величини в електричну форму енергії. Найбільш важливі з фізичних явищ, які використовуються в активних ПВП, наведено в табл. 1.3, а принципи їх технічної реалізації ілюструють схеми на рис. 1.24.

Первинний вимірювальний перетворювач, що реалізує ***термоелектричний ефект*, –** термопара – містить два провідники (термоелектроди) *A* та *B* різної хімічної природи (рис. 1.24, *а*). їх з'єднання (спаї), що мають температури t_1 і t_2, є місцем виникнення термо-ЕРС $e(t_1, t_2)$. Термо-ЕРС e пропорційна вимірюваній температурі t_1 коли температура t_2

відома (неробочий спай термопари розміщено в середовищі з постійною температурою, яка дорівнює, наприклад, 0 °С).

У ПВП *з* ***піроелектричним ефектом*** певні кристали, названі *піроелектриками* (наприклад, тригліцин-сульфати), зазнають спонтанної електричної поляризації, що залежить від їх температури, і на поверхнях двох протилежних граней з'являються електричні заряди протилежних знаків, пропорційні цій поляризації (рис. 1.24, *б*). Поглинений кристалом потік випромінювання Ф зумовлює підвищення його температури та відповідну зміну поляризації, що вимірюється за зміною напруги на затискачах конденсатора.

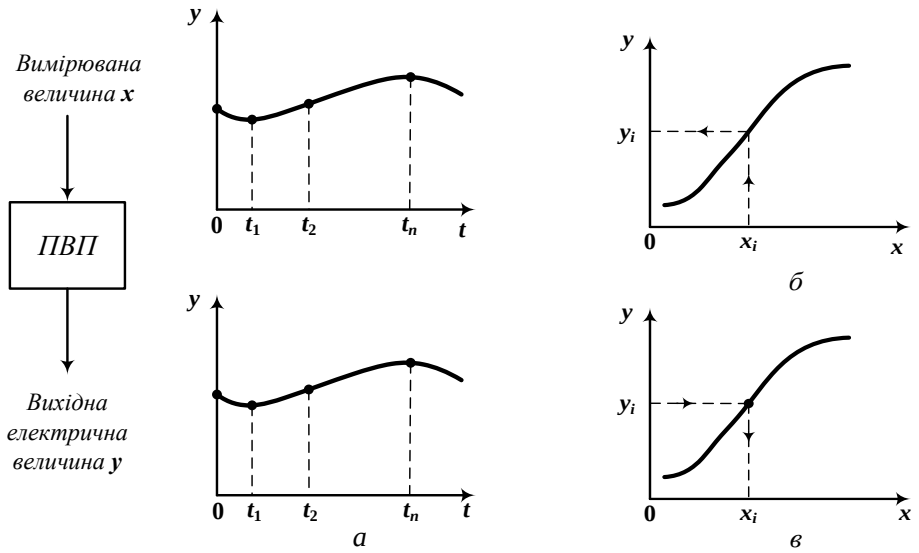


Рис. 1.24. Приклади змінювання в часі вимірюваної величини *x* і відповідної реакції у ПВП (*а*) та його градуювальної характеристики (*б*, *в*):

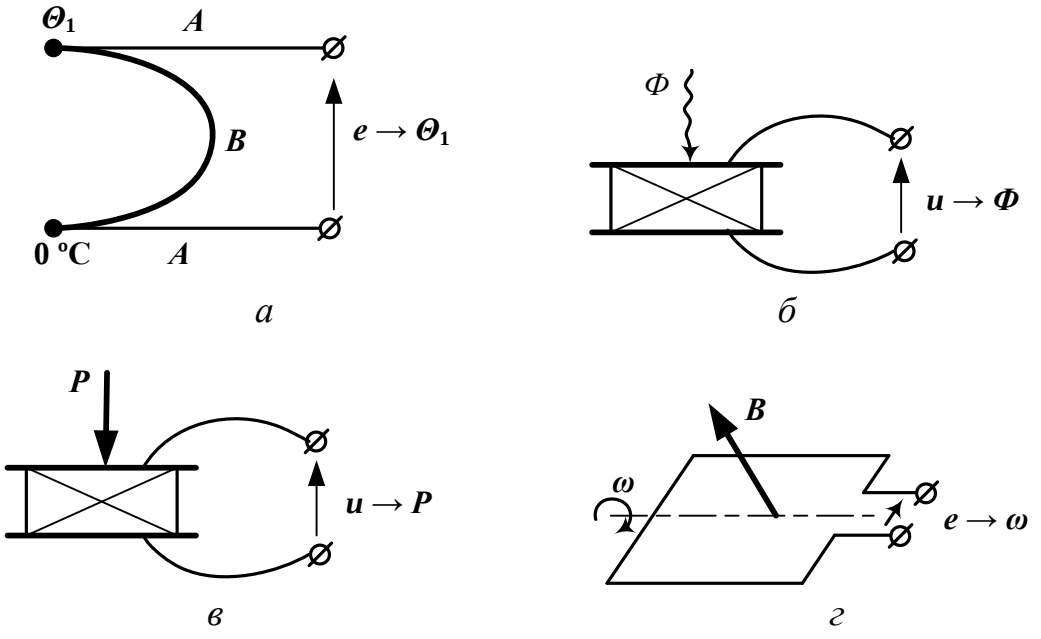
б – отримання градуювальної кривої за відомими значеннями вимірюваної величини x; *в* – використання градуювальної кривої для визначення x_i,

Таблиця 1.3.

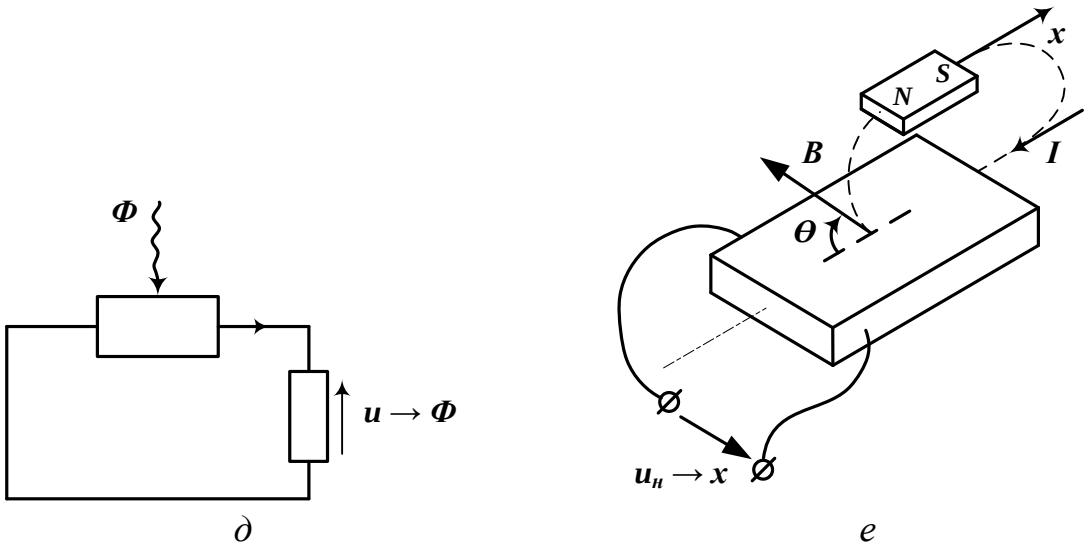
Фізичні ефекти в активних ПВП

Вимірювана величина	Використовуваний фізичний ефект	Вихідна величина
Температура	Термоелектричний ефект	Напруга
Потік оптичного випромінювання	Піроелектричний ефект	Заряд
	Зовнішній фотоефект	Струм
	Внутрішній фотоефект у напівпровіднику з *p-n-переходом*	Напруга
	Фотоелектромагнітний	Напруга
Сила, тиск, прискорення	П’єзоелектричний ефект	Заряд
Швидкість	Електромагнітна індукція	Напруга
Переміщення	Ефект Холла	Напруга

У ПВП *з* ***п’єзоелектричним ефектом*** змінювання механічного напруження (від дії зовнішньої сили *F*) у кристалі п’єзоелектрика, наприклад кварцу, призводить до деформації, що спричиняє появу на протилежних поверхнях кристала однакові за величиною електричні заряди протилежного знака (рис. 1.25, *в*). Отже, для вимірювання сили або величин, що приводять до неї (вібрації, тиску, прискорення), досить виміряти напругу між затискачами п’єзоелектрика.



а *б* *в* *г*



д *е*

Рис. 1.25. Приклади використання фізичних явищ для побудови активних ПВП:

а – термоелектричний ефект; *б* – піроелектричний ефект; *в* – п’єзоелектричний ефект; *г* – ефект електромагнітної індукції; *д* – фотоелектричний ефект; *е* – ефект Холла

У ПВП, що використовує *явище* ***електромагнітної індукції,*** у разі переміщення провідника в постійному електромагнітному Полі виникає ЕРС, пропорційна магнітному потокові, а отже, і швидкості руху провідника (рис. 1.25, г). Так само, коли замкнутий контур зазнає впливу змінного магнітного потоку під час переміщення в полі або самого контуру, або джерела поля (наприклад, магніту), індукована в контурі ЕРС дорівнює за величиною (і протилежна за знаком) швидкості змінювання магнітного потоку. Таким чином, вимірювання ЕРС електромагнітної індукції дозволяє визначити швидкість переміщення об’єкта, механічно з’єднаного з рухомим елементом подібного ПВП.

У ПВП використовуються також ***фотоелектричні ефекти,*** різні за своїми проявами, але об’єднані загальною причиною їх виникнення – звільненням електричних зарядів у речовині під дією світлового або, у більш загальному розумінні, електромагнітного випромінювання, довжина хвилі якого менша від певного граничного значення, що є характеристикою чутливого матеріалу (рис. 1.25, *д*).

Вакуумний фотоелемент із зовнішнім фотоефектом. Звільнені в ньому фотоелектрони залишають освітлений потоком Ф фотокатод й утворюють пропорційний освітленості струм, що надходить до анода під дією прикладеного електричного поля.

Напівпровідниковий фотодіод із внутрішнім фотоефектом. Електрони й дірки, звільнені в околі освітленого *p*-*n*-переходу в напівпровіднику, переміщуючись під дією електричного поля, зумовлюють змінення напруги на краях напівпровідника.

Первинні вимірювальні перетворювачі на основі фотоелектромагнітного ефекту. Прикладання магнітного поля,

перпендикулярного до спадного випромінювання, викликає в освітленому напівпровіднику появу електричної напруги в напрямі нормалі до поля та спадного випромінювання. Фотоелектричні ефекти є основою фотометрії й забезпечують передавання інформації, носій якої – світло.

Первинні вимірювальні перетворювачі на основі ефекту Холла. У разі пропускання електричного струму через пластинку напівпровідника, що розміщена в однорідному магнітному полі (вектор магнітної індукції B становить кут 0 з напрямом струму I), у напрямі, перпендикулярному до поля, виникає ЕРС

$$u_H = k_H IB \sin\theta$$

де $k_н$ залежить від типу провідності та розмірів пластини (рис. 1.25, *е*).

Первинні вимірювальні перетворювачі Холла використовують для вимірювання переміщень x об'єктів, а також величин, перетворюваних у переміщення, наприклад, тиску. Постійний магніт ПВП механічно з'єднують з об'єктом, і зі зміщенням магніту пропорційно змінюється вихідна напруга ПВП (струм при цьому залишається незмінним).

Пасивні ПВП. Як уже зазначалося, пасивні ПВП вмикаються в спеціальну електричну схему, що містить джерело живлення та схему формування сигналу. Ряд фізичних ефектів і матеріалів, використовуваних для створення пасивних ПВП, наведено в табл.1.4.

Таблиця 1.4

Фізичні ефекти в пасивних ПВП

Вимірювана величина	Електрична характеристика, що змінюється під дією вимірюваної величини	Тип використовуваних матеріалів
Температура	Опір	Метали (платина, мідь, нікель), напівпровідники
Наднизькі температури	Діелектрична проникність	Скло, кераміка
Потік оптичного випромінювання	Опір	Напівпровідники
Деформація	Опір	Сплави нікелю, легований кремній
	Магнітна проникність	Феромагнітні сплави
Переміщення	Опір	Магніторезистивні матеріали: вісмут, антимонід індію
Вологість	Опір Діелектрична проникність	Хлористий літій, оксид алюмінію, полімери
Рівень	Діелектрична проникність	Рідкі ізоляційні матеріали

Найчастіше використовують потенціометричну та мостову вимірювальні схеми, а також коливальний контур і операційний підсилювач. Потенціометрична схема містить джерело напруги та ПВП-потенціометр, що з'єднані паралельно. Найпростішу схему потенціометричного перетворювача, в якому механічні зміни на вході (зміщення − лінійні чи кутові) спричинюють появу на його виході електричного сигналу, пропорційного вхідному сигналові, показано на рис. 1.26.

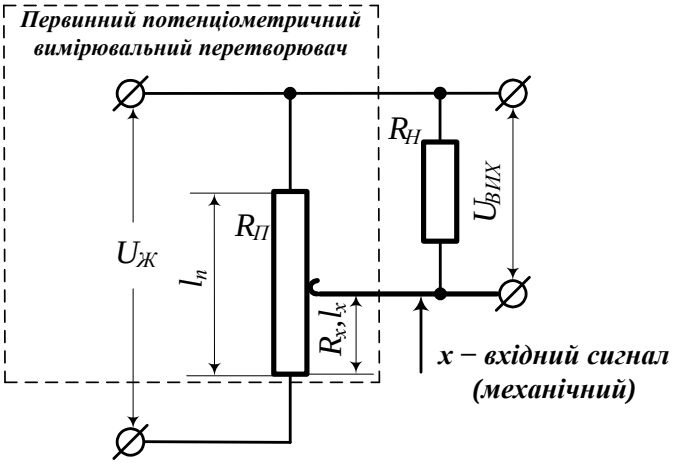


Рис.1.26. Принципова електрична схема пасивного вимірювального перетворювача

У мостовій схемі змінення імпедансу ПВП характеризує розбаланс відповідного моста (Уїтстона, Максвелла, Сауті, Віна тощо). Резонансний коливальний контур є частиною генератора коливань і визначає його частоту. Коли індуктивний або ємнісний ПВП є елементом цього контуру, варіації його реактивного опору зумовлюють відповідні зміни частоти коливань.

Операційний підсилювач використовують для оброблення вихідного сигналу, що являє собою різницю двох сигналів вимірювальної схеми. Залежно від цієї різниці змінюється коефіцієнт підсилення операційного підсилювача.

Від вибору схеми формування сигналу залежать основні метрологічні характеристики вимірювальних комплексів − похибка, чутливість, лінійність і т. ін.

Комбіновані ПВП. Під час вимірювання деяких неелектричних величин не завжди вдається перетворити їх безпосередньо в електричну величину. У цих випадках здійснюють подвійне перетворення вихідної (первинної) вимірюваної величини − спочатку в проміжну неелектричну величину, яку відтак перетворюють у вихідну електричну величину. Сукупність двох відповідних вимірювальних перетворювачів утворює комбінований ПВП.

Подібні перетворення зручні для вимірювання механічних величин що спричиняють у первинному перетворювачі (ЧЕ) деформацію або переміщення вихідного елемента, до яких чутливий вторинний перетворювач Так, тиск

можна виміряти за допомогою мембранного первинного вимірювального перетворювача, деформація мембрани якого перетвориться в електричну величину вимірювальним перетворювачем, що реагує на механічне зміщення, наприклад потенціометричним (рис. 1.27).

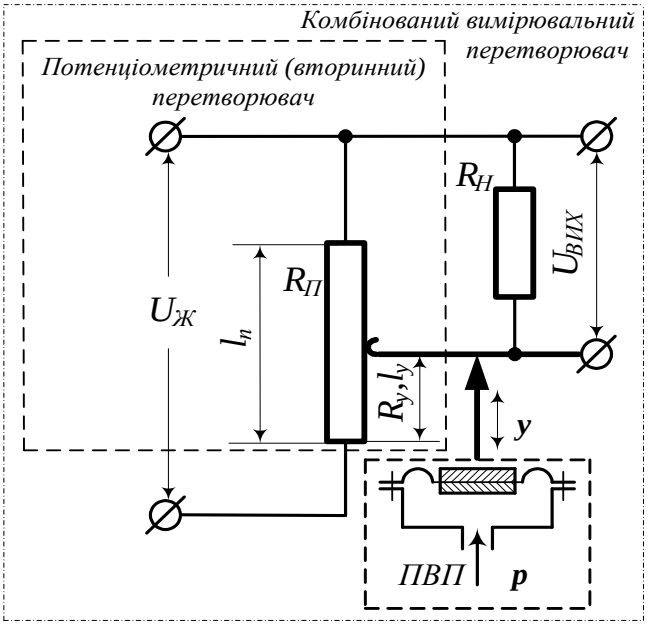


Рис.1.27 Принципова електрична схема комбінованого вимірювального перетворювача

Якщо механічні напруження в первинному перетворювачі не перевищують межі пружності, то його характеристика лінійна. Характеристику перетворення ПВП в цілому визначають градуюванням.

Усі функції активних, пасивних і комбінованих вимірювальних перетворювачів аналогові, тому в загальному випадку їхні сигнали теж аналогові.

Впливові величини. У реальних умовах експлуатації ПВП може зазнавати впливу не тільки вимірюваної величини, але й інших фізичних (впливових) величин g_i до яких чутливий ПВП, − температури, тиску, вібрації, вологості, електричних і магнітних полів і т. ін. Ці впливи можуть призвести до зміни вихідного електричного сигналу ПВП та до появи додаткової похибки вимірювання, тому ПВП, призначений для перетворення певної фізичної величини, повинен якомога менше змінювати свої характеристики під упливом інших параметрів g_i. Таким чином, вихідний сигнал ПВП y має залежати тільки від однієї величини x, а всі прирости вихідного сигналу $\Delta y g_i$, зумовлені зміною зовнішніх параметрів g_i, мають бути малими навіть порівняно з граничною (пороговою) чутливістю ПВП.

$$\Delta y_{\text{пор}i} : \Delta y_{gi} \ll \Delta y_{\text{пор}i}$$

Для цього потрібно виконати одну з умов:

знизити значення впливових величин відповідним захистом ПВП, використовуючи, наприклад, магнітні екрани, антивібраційні підкладки тощо;

стабілізувати впливові величини та градуювати ПВП для цих умов, використовуючи, наприклад, термостат, джерело стабілізованої напруги живлення тощо;

використовувати таку схему, яка б компенсувала вплив паразитних величин, наприклад, міст Уїтстона із двома однаковими ПВП, один з яких призначений для вимірювання, а другий – для компенсації похибки, спричиненої дією впливових чинників.

Здавалося б, умова малості $\Delta y g_i$, не обов'язкова, тому що можна вимірювати всі g_i у процесі досліджень, а відтак уводити відповідні поправки. Насправді ж це роблять тільки у виняткових випадках, адже подібна організація дослідження економічно невигідна, оскільки необхідність додаткового вимірювання всіх g_i потребує додаткових ресурсів і нераціонально завантажує автоматизовану систему. Крім того, істотно зростають витрати на проведення калібрувальних вимірювань, а додаткові вимірювання констант для обчислення поправок і знаходження аналітичної залежності для визначення поправок у проміжних точках (у яких не були проведені калібрувальні вимірювання) виконуються завжди з похибками, що неминуче збільшує повну похибку вимірювання.

Виходячи з викладеного, прагнуть вибирати ПВП, показання яких якомога менше залежали б від зовнішніх параметрів. Причому зазвичай набагато вигідніше стабілізувати зовнішні умови, ніж проводити калібрування та додаткові вимірювання відповідних параметрів.

1.4.3. Обґрунтування вибору вимірювального перетворювача

Впливові величини. У реальних умовах експлуатації ПВП може зазнавати впливу не тільки вимірюваної величини, але й інших фізичних (впливових) величин f_i, до яких чутливий ПВП, – температури, тиску, вібрації, вологості, електричних і магнітних полів і т. ін. Ці впливи можуть призвести до зміни вихідного електричного сигналу ПВП та до появи додаткової похибки вимірювання. Тому ПВП, призначений для перетворення певної фізичної величини, повинен якомога менше змінювати свої характеристики під упливом інших параметрів f_i.

Таким чином, вихідний сигнал ПВП має залежати тільки від однієї вхідної величини $\boldsymbol{x}$, а всі прирости вихідного сигналу Δy_{fi}, зумовлені зміною зовнішніх параметрів f_i мають бути малими навіть порівняно з граничною (пороговою) чутливістю ПВП $\Delta y_{пор}$: $\Delta y_{fi} << \Delta y_{пор}$.

Для цього потрібно виконати одну з умов:

знизити значення впливових величин відповідним захистом ПВП, використовуючи, наприклад, магнітні екрани, антивібраційні підкладки тощо;

стабілізувати впливові величини та градуювати ПВП для цих умов, використовуючи, наприклад, термостат, джерело стабілізованої напруги живлення тощо;

використовувати таку схему, яка б компенсувала вплив паразитних величин, наприклад, міст Уїтстона із двома однаковими ПВП, один з яких

призначений для вимірювання, а другий – для компенсації похибки, спричиненої дією впливових чинників.

Здавалося б, умова малості Δy_{fi} не обов'язкова, тому що можна вимірювати всі f_i у процесі досліджень, а відтак уводити відповідні поправки. Насправді ж це роблять тільки у виняткових випадках, адже подібна організація дослідження економічно невигідна, оскільки необхідність додаткового вимірювання всіх f_i, потребує додаткових ресурсів і нераціонально завантажує автоматизовану систему. Крім того, істотно зростають витрати на проведення калібрувальних вимірювань, а додаткові вимірювання констант для обчислення поправок і знаходження аналітичної залежності для визначення поправок у проміжних точках (у яких не були проведені калібрувальні вимірювання) виконуються завжди з похибками, що неминуче збільшує повну похибку вимірювання.

Виходячи з викладеного, прагнуть вибирати ПВП, показання яких якомога менше залежали б від зовнішніх параметрів. Причому зазвичай набагато вигідніше стабілізувати зовнішні умови, ніж проводити калібрування та додаткові вимірювання відповідних параметрів.

Загальні підходи до вибору вимірювального перетворювача. У загальному випадку для вибору перетворювача розглядають три основні умови:

– потрібні характеристики перетворювача;

– тип перетворювача;

– уживаний ЧЕ.

Характеристики перетворювача. Є декілька параметрів, які варто враховувати, вибираючи перетворювач для конкретного використання:

чутливість – вихідний сигнал, який виробляє перетворювач за заданих значень вхідного сигналу та рівня збудження ($E_{ЖИВ}$);

розрізнення – найменший вхідний сигнал, який можна виміряти;

відтворюваність – показує, наскільки наближені результати двох вимірювань однієї й тієї ж величини;

точність – залежить (серед іншого) від робочих умов, потребує врахування впливу навколишнього середовища;

частотна характеристика – це залежність вихідного сигналу від змін частоти на вході; вона має бути плоскою в діапазоні вимірювань, а резонансна частота – бути за його межами;

динамічна характеристика перетворювача – визначає його реакцію на східчасту зміну вхідного сигналу. Вона характеризується декількома показиками, в саме: часом регулювання $t_{рег}$, перерегулюванням σ, часом відгуку $t_{від}$, характером перехідного процесу, декрементом загасання d, статичною точністю δ. Час регулирования або швидкодія визначається постійною часу вимірювального перетворювача $T_{ВП}$.

Постійна часу – це час, потрібний перетворювачу, щоб досягти 63 % приросту вихідного сигналу. Час, потрібний перетворювачу для досягнення 90 % від рівня його кінцевого сигналу, називають *часом відгуку* перетворювача.

Так, при обґрунтуванні вибору датчика температури для регулятора температури повітря в приміщенні необхідно в першу чергу звернути увагу на те, який діапазон зміни температури повітря в приміщенні відповідно до технічних умов повинна забезпечити проектована система регулювання.

Нехай цей діапазон складає 10...35 °С. Найближче до цього діапазону знаходяться межі вимірювання мідного термометра опору ТОМ-8012, які складають 0...50 °С. Інерційність цього перетворювача (тобто величина його постійної часу $T_{ВП}$) складає 80 с. Для того, щоб цей перетворювач у процесі стабілізації температури повітря Θ на заданому рівні Θ_0, не вносив неприпустиму динамічну похибку вимірювання температури, його постійна часу $T_{ВП}$ повинна бути не менше, ніж на порядок меншою від постійної часу об'єкта керування $T_{ОК}$. Для визначення останньої необхідно, використовуючи відомі методики, апроксимувати передатну функцію об'єкта керування, отриману експериментально або аналітично, передатною функцією інерційної ланки з запізнюванням $\tau_{ок}$.

Припустимо, виконавши зазначену операцію, одержали передатну функцію об єкта у вигляді:

$$W(s) = \frac{4}{750s + 1} \cdot e^{-118 \cdot s}. \qquad (1.33)$$

З виразу (1.33) знаходимо, що постійна часу об’єкта $T_{ОК}$ при цьому складає 750 с. З огляду на сказане вище, максимальна постійна часу вимірювального перетворювача повинна бути не більше $T_{ОК}$ /10 = 75 с. Звідси видно, що постійна часу обраного датчика температури ТОМ-8012, рівна 80 с, більша за постійну часу об’єкта, рівної 75 с., що неприпустимо. Отже, обраний датчик не підходить для проектованої САР температури повітря.

Вибираємо мідний термометр опору ТОМ-8034М, постійна часу якого дорівнює 30 с, а межі вимірювання складають (–50...+85)°С.

Крім того, необхідно враховувати лінійність характеристики перетворювача (зокрема, наявність гістерезису), стійкість до шумів тощо.

Тип перетворювача (найчастіше перетворювачі класифікують за принципом дії чи за практичним використанням) і сфера його використання взаємопов'язані. Наприклад, тензоперствoрювач можна використовувати для перетворень тиску (сили), зміщення, положення, швидкості, прискорення, вібрації, потенціометричний і лінійний диференціально-трансформаторний перетворювачі – для перетворення перших п'яти параметрів, а термоелектричний перетворювач – тільки для температури.

Чутливі (силові) елементи. Чутливий елемент здійснює первинне перетворення вимірюваної величини і може бути як складовою конструкції перетворювача, так і окремим пристроєм. Його вибір визначається (попри інші характеристики) тим, який вид вхідного сигналу сприймає наступний за ним перетворювач. Якщо на його вхід подаватиметься лінійне зміщення x, то вибраний ЧЕ має перетворювати вимірювану величину саме у x, наприклад, для вимірювання тиску (або рівня рідини) як ЧЕ можна використовувати

різні мембрани, сильфони, (рис. 1.26, *а*), манометричні трубки тощо. А якщо на вхід перетворювача треба подати кутове зміщення α, можна використати скручену трубку Бурдона чи спіральну манометричну пружину (рис. 1.28, *б*).

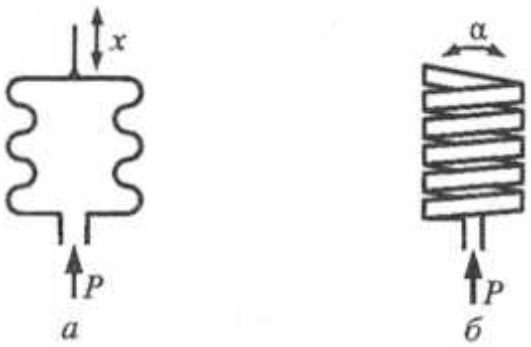


Рис. 1.28. Пружні чутливі елементи:
а – сильфон, *б* – спіральна (багатовиткова) манометрична пружина

Поряд із входом важливе значення має також природа вихідного сигналу, позаяк саме вона визначає вибір методів і для подальшого перетворення чи вимірювання.

І навпаки, якщо є конкретний ЧЕ, то для нього треба підбирати відповідний перетворювач. Наприклад, для сильфона – диференціально-трансформаторний або потенціометричний з лінійним зміщенням повзунка реохорда, а для спіральної манометричної пружини – феродинамічний чи реостатний з кутовими зміщеннями рамки у першого та повзунка у другого.

1.4.4. Перспективи розвитку сенсорної техніки

Сенсор (ПВП) – наймасовіший вимірювальний засіб. Сукупність ПВП на об’єкті дослідження формує вимірювальну інформацію, придатну для її подальшого використання людиною, обчислювальною машиною чи пристроєм у контурі керування досліджуваним об’єктом. Ця особливість і обумовлює основні вимоги до ПВП. Він має надійно функціонувати в усіх робочих середовищах досліджуваного об’єкта і водночас надійно працювати як елемент конструкції основного виробу.

Закладені в будову сучасного сенсора конструктивні рішення мають забезпечувати можливість встановлювати його в будь-яку вимірювальну систему. Конструктивне вирішення цієї проблеми полягає у модульному конструюванні за всіма правилами агрегатування та системного підходу, тобто застосовувані конструктивні та технологічні рішення мають задовольняти умови конструктивної, технологічної, метрологічної, інформаційної, алгоритмічної сумісності.

Одна з важливих вимог до ПВП – обґрунтований вибір виду вихідного сигналу. Очевидно, що стандартним сигналом повинен бути сигнал, мінімально енергоємний та максимально стійкий до завад. Таким, безумовно, є частотно-модульований сигнал, а перетворюватись амплітудно-модульований сигнал в частотно-модульований має в самому сенсорі.

Розвиток електронної технології призвів до ситуації, коли сучасні електронні засоби вимірювальної техніки як вторинні перетворювачі електричних засобів вимірювань неелектричних величин мають на один-два порядки вищі метрологічні характеристики, ніж первинні перетворювачі. Тобто натепер первинні перетворювачі – основні елементи вимірювальних кіл засобів вимірювань неелектричних величин, від чутливості, точності, швидкості та стійкості яких до зовнішніх чинників залежать повнота, своєчасність і достовірність отримуваної інформації про досліджувані об'єкти та процеси. Тому сьогодні приділяють велику увагу і виділяють значні кошти на проведення наукових досліджень, конструкторських робіт для поліпшення існуючих та створення нових первинних перетворювачів.

Основні напрями розвитку сучасних первинних перетворювачів зводяться до такого [35]:

– поліпшення технології виготовлення традиційних первинних перетворювачів;

– створення нових конструкцій перетворювачів на відомих принципах;

– використання нових методів та фізичних закономірностей, що закладаються в основу принципу дії перетворювачів;

– інтеграція первинних перетворювачів та елементів вторинних засобів вимірювань у єдиний конструктів для зменшення впливу ліній зв'язку на результат вимірювань та забезпечення повнішої уніфікації за вихідним сигналом.

Перший напрям значною мірою вже вичерпав себе, хоча використання досконаліших конструкцій і підвищує стійкість первинного перетворювача до впливових чинників, а застосування для ЧЕ матеріалів, ретельно очищених від небажаних домішок, підвищує стабільність їх характеристик.

Перспективніший напрям – створення нових конструкцій перетворювачів за традиційними принципами. Такий напрям спирається на позитив ний досвід виготовлення й експлуатації існуючих конструкцій первинних перетворювачів і не потребує великих фінансових затрат, які були б потрібними для дослідження нових фізичних ефектів.

Значну частину від нових первинних перетворювачів становлять мініатюрні перетворювачі механічних величин та параметрів руху з використанням напівпровідникових мембранних ЧЕ резистивного та ємнісного типів, а також п'єзоелектричних та магнітопружних перетворювачів, що в поєднанні з лінеаризувальними й підсилювальними елементами утворюють перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом.

Для виявлення та контролю концентрації оксидів в атмосфері відомі перетворювачі на основі кварцових резонансних структур, які складаються з двох ідентичних п'єзоелементів певного зрізу з однаковими резонансними частотами. Один з кристалів покритий газочутливою плівкою, а другий – ні. Резонансна частота кристала з газочутливою плівкою змінюється залежно від ступеня абсорбції досліджуваного газу. Міра вимірюваної величини – різниця частот резонаторів.

Швидкими темпами розвиваються оптоволоконні перетворювачі, зокрема, перетворювачі переміщень, що грунтуються на принципі модуляції відбитого світла. Оптоволоконні перетворювачі застосовують як перетворювачі швидкостей газів та рідин, концентрацій (зокрема, як первинні перетворювачі вологомірів).

Надзвичайно інтенсивний розвиток сучасної мікроелектроніки уможливив здійснення метрологічного оброблення інформативного сигналу та передавання результатів з використанням стандартних інтерфейсів. Це дозволило значно знизити вимоги до лінії зв'язку, підвищити надійність, точність та завадостійкість вимірювань. Використання високопродуктивних мікропроцесорних засобів з мікроспоживанням у мініатюрному виконанні дало змогу реалізувати складні алгоритми автокалібрування вимірювального тракту та самодіагностики. Тому основна вимога до первинних перетворювачів, які перетворюють вимірювану величину в електричний сигнал, – стабільність їх статичної функції перетворення. Розвиток таких інтелектуальних перетворювачів значно спростив побудову вимірювальних мереж багатоточкового контролю.

Контрольні запитання

1. Назвіть методи вимірювань і коротко розкрійте їх сутність.
2. Які похибки притаманні засобам вимірювань залежно від їх статичних і динамічних властивостей?
3. Як розділяються похибки засобів вимірювань залежно від способу їх виразу?
4. Як визначити абсолютну похибку засобу вимірювання за входом і виходом?
5. Як оцінити відносну похибку засобу вимірювання?
6. Яким чином розділяються похибки засобів вимірювань залежно від характеру зміни під час повторних вимірювань?
7. Які похибки властиві засобам вимірювань залежно від умов їх експлуатації?
8. Як розділяються похибки засобів вимірювань залежно від вимірюваної величини?
9. Що розуміється під адитивною похибкою і як вона усувається в засобу вимірювання?
10. Що розуміється під мультипликативною похибкою і які причини її виникнення?
11. Що розуміється під адитивною похибкою і як вона усувається в засобі вимірювання?
12. Що розуміють під варіацією (гистерезисом) вихідної величини вимірювального перетворювача?
13. Що розуміють під нормованим значенням похибки засобу вимірювання і в який документ засобу вимірювання заноситься цей параметр?

14. Поясните поняття «номінальна характеристика» засобів вимірювань, «індивідуальна характеристика» засобу вимірювання.

15. Поясните поняття: клас точності, діапазон вимірювань, динамічний діапазон, відтворюваність результатів вимірювань, перевірка засобу вимірювань.

16. Що таке вимірювальний перетворювач і яке його призначення?

17. Як називається вимірювальний перетворювач, в якому здійснюється одноразове перетворення вхідного сигналу?

18. Приведіть визначення первинного вимірювального перетворювача.

19. Зобразите функціональну схему вимірювального перетворювача.

20. Якими основними характеристиками повинен володіти вимірювальний перетворювач?

21. Назвіть основні функції інтелектуальних вимірювальних перетворювачів.

22. За якими структурними схемами здійснюється перетворення інформації у вимірювальних перетворювачах?

23. Які основні вимоги пред'являються до вимірювальних перетворювачів?

24. За якими ознаками здійснюється класифікація вимірювальних перетворювачів?

25. Як розділяються вимірювальні перетворювачі за принципом перетворення енергії?

26. З якою метою в рамках ДСП здійснюється уніфікація і стандартизація вихідних сигналів вимірювальних засобів?

27. За якими основними характеристиками здійснюється уніфікація вихідних сигналів вимірювальних засобів?

28. З яких функціональних елементів складається вимірювальний перетворювач з уніфікованим сигналом?

29. Назвіть природні вихідні сигнали вимірювальних перетворювачів.

30. Назвіть уніфіковані вихідні сигнали вимірювальних перетворювачів.

31. Назвіть загальні підходи по вибору вимірювальних перетворювачів?

32. Які умови треба враховувати при виборі вимірювального перетворювача?

33. За якими параметрами здійснюється вибір вимірювального перетворювача?

РОЗДІЛ 2.
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СИГНАЛІВ І СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

2.1. Загальні відомості

Крім ПВП, у системах автоматичного контролю та керування широко застосовують і різноманітні проміжні перетворювачі, до яких належать також ***передавальні*** перетворювачі, призначені забезпечувати передавання сигналів вимірювальної інформації на відстань – саме на їх основі створюються системи дистанційного передавання інформації.

Зазвичай такі перетворювачі пасивні, тобто вони не можуть перетворювати енергію безпосередньо, а лише керують енергією чи збудженням, які надходять від зовнішнього джерела.

Виходячи з класифікації енергії на шість різних форм, на рис. 2.1 показано можливі комбінації вхідного (вимірюваного) та вихідного сигналів і збудження для будь-яких перетворювачів. Легко бачити, що схема охоплює велику кількість різних типів перетворювачів.

Конструктивно перетворювачі різних систем реалізують два основні принципи: принцип компенсації переміщень або принцип компенсації сил. З електричних аналогових перетворювачів, виконаних за схемою компенсації переміщень для перетворення неелектричних величин в електричний вихідний сигнал і передавання показань на відстань, найбільшого використання набули диференціально-трансформаторні, феродинамічні, сельсинні, магнітомодуляційні (тільки для перетворення), з пневматичних – перетворювачі «лінійне переміщення – пневмосигнал», а за схемою компенсації сил – силові («сила – тиск» і «сила – струм»), перехідні (електропневматичні, пневмоелектричні) перетворювачі.



Рис. 2.1. Варіанти використання перетворювачів

Характерна особливість перетворювачів, виконаних за схемою компенсації переміщень, – великі (до 20...25 мм) переміщення рухомих

деталей конструкції, що спричиняє виникнення значних реактивних сил у пружних елементах (мембранах, сильфонах, стрічкових опорах тощо). Це знижує точність таких перетворювачів, збільшує їх інерційність. Переміщення рухомих елементів перетворювачів, виконаних за схемою компенсації сил, настільки малі (соті частки міліметрів), що проблема врахування дії реактивних сил у пружних елементах узагалі не виникає, а наявність силового зворотного зв'язку забезпечує значне підвищення їх точності.

Системи передавання вимірювальної інформації призначені для збору інформації з віддалених від спостерігача об'єктів. У телемеханіці подібні вимірювальні системи називають телевимірювальними (від грец. *tele* – далеко).

Для контролю та керування технологічними процесами широко використовують телевимірювальні системи, які називають ***системами дистанційного передавання сигналів.*** За допомогою цих систем вимірювальну інформацію можна передавати на відстань від декількох десятків метрів до 10.. .20 км.

Інформація з каналів зв'язку у вимірювальних системах передається у формі відповідних сигналів. Сигнали формуються нанесенням інформації на матеріальні носії, якими служать періодичні процеси чи фізичні величини, наприклад електричний струм, тиск газу, електромагнітні коливання, звукові хвилі тощо. Нанесення інформації на носії здійснюється змінюванням одного чи декількох параметрів носія відповідно до переданої інформації. Процес нанесення інформації на носій називають *модуляцією* (найбільшого поширення набули пряма модуляція фізичних величин і частотна модуляція гармонічних коливань).

За видом енергії носія інформації системи передавання інформації поділяють на електричні, пневматичні, гідравлічні та комбіновані. Інформація в зазначених системах передається у вигляді «природних» (зміщення, зусилля, зміни об'єму тощо) чи уніфікованих сигналів. Основні види та параметри уніфікованих сигналів наведено на (рис. 1.19).

2.2. Електричні параметричні перетворювачі

До електричних ***параметричних перетворювачів*** (резистивних перетворювачів) відносяться:

- потенціометричні перетворювачі;
- тензометричні перетворювачі;
- терморезисторні перетворювачі;
- фоторезисторні перетворювачі.

Базовим елементом *резистивних перетворювачів* є *резистор*, що володіє основним параметром – *електричним активним опором*. Опір постійному струму одноелементного резистивного перетворювача залежить від його

довжини l, поперечного перетину S, і питомого опору матеріалу ρ згідно виразу:

$$R_0 = \rho l / S. \qquad (2.1)$$

Резистивний перетворювач переміщення являє собою змінний, як правило, дротяний опір, рухомий контакт (повзунок) якого кінематично пов'язаний з джерелом вхідного сигналу – кутове або лінійне переміщення.

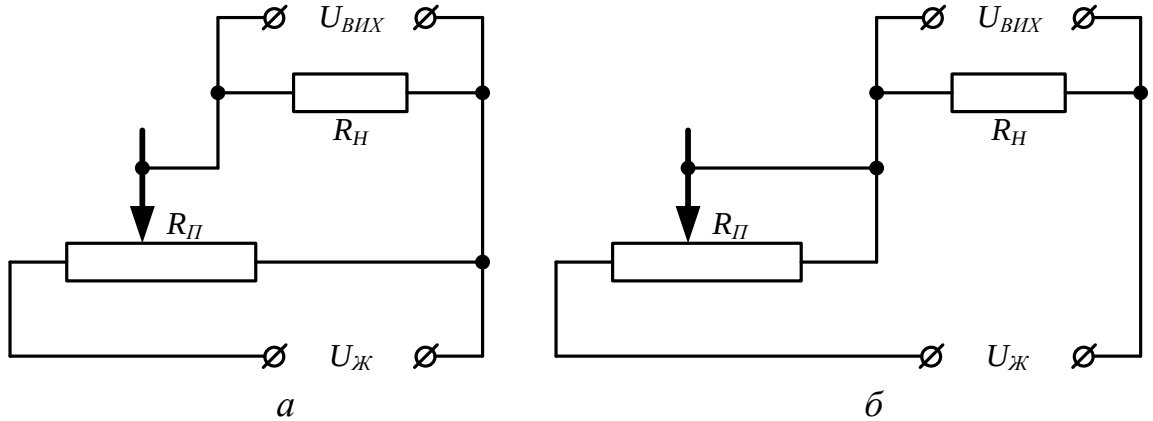
Перетворювач складається з намотаної на каркас обмотки та рухомого контакту. Форма каркаса залежить від характеру перетворюваного переміщення (лінійного, кутового) та від форми потрібної функції перетворення (лінійної, нелінійної). Використовують каркаси, виготовлені з діелектрика (гетинаксу, кераміки) або металу (дюралюмінію з анодованою поверхнею) у вигляді пластини, циліндра, кільця тощо. Для обмотки використовують дріт з різних сплавів платини, що мають підвищену корозіє- та зносостійкість, а також використовують константан, манганін, фехраль та паладієвольфрамові сплави.

Рухомий контакт РП може бути створеним ковзною константановою щіткою (плоскою пружиною, дротом) або ковзним пружинистим притискачем-повзунком (перетворювачі типу реохорда). Наявність ковзного рухомого контакту зумовлює підвищене стирання обмотки та повзунка, що може спричинювати порушення контакту.

Резистивні перетворювачі переміщення (рис. 2.2) залежно від схеми включення перетворювача $R_П$ і навантаження вимірювального ланцюга $R_Н$ підрозділяються на ***потенціометричні*** і ***реостатні*** перетворювачі.

Потенціометричний перетворювач включається за схемою дільника напруги (рис. 2.2, *а*). Реостатний перетворювач включається послідовно з навантаженням вимірювального ланцюга (рис. 2.2, *б*).

Потенціометричне включення резистивного перетворювача є найбільш переважним при співвідношенні $R_Н >> R_П$, реостатне включення вимагає сумірності $R_Н$ і $R_П$, а також постійності значення $R_Н$.



а *б*

Рис. 2.2. Принципові електричні схеми включення резистивних перетворювачів:

а – потенціометрична схема; *б* – реостатна схема

2.2.1. Потенціометричні перетворювачі

Потенціометричні перетворювачі застосовуються для перетворення кутових або лінійних переміщень у відповідну зміну опору, струму або напруги.

Оскільки в переміщення можуть бути перетворені багато неелектричних величин (тиск, витрата, рівень і ін.), то потенціометричні перетворювачі дуже часто використовують як вторинні перетворювачі неелектричних величин в електричні (рис. 2.3).

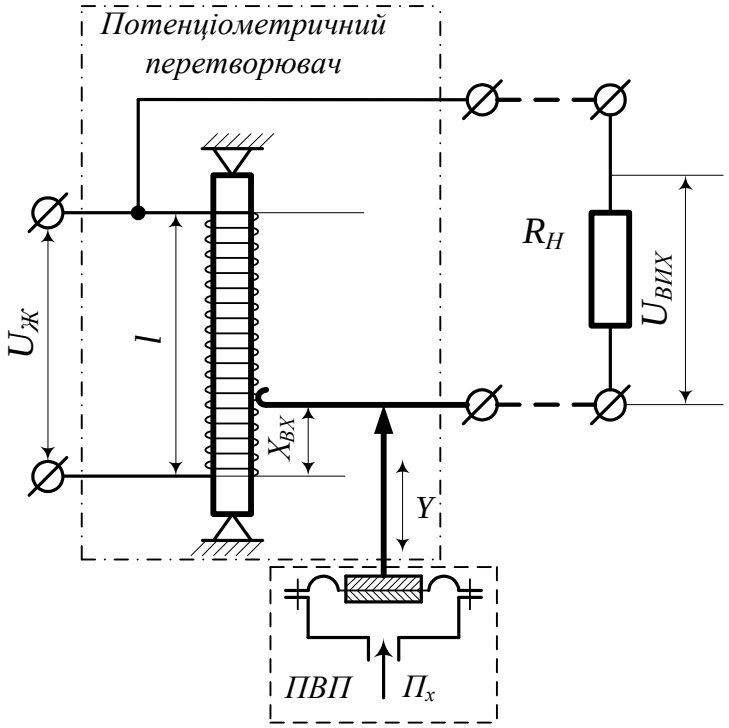


Рис. 2.3. Принципова електрична схема включення потенціометричного вимірювального перетворювача

Залежно від матеріалу чутливого елементу потенціометричні перетворювачі розділяються на дротяні і недротяні.

У пристроях автоматики широко застосовують ***дротяні потенціометричні перетворювачі,*** які відрізняються високою точністю і стабільністю функції перетворення, мають малий перехідний опір, низький рівень власних шумів, малий температурний коефіцієнт опору (ТКО). До їх недоліків відносяться низька роздільна здатність, порівняльний невисокий опір (до десятків кОм), обмежена можливість застосування на змінному струмі, обумовлена залишковою індуктивністю і ємкістю намотування.

Залежно від конструктивного виконання розрізняють потенціометричні перетворювачі з поступальним і обертальним переміщенням рухомого контакту. Останні, крім того, діляться на одно- і багатооборотні.

Конструктивно потенціометричні перетворювачі (рис. 2.4, *а, б*) складаються з каркаса 1, обмотки з ізольованого дроту 2 і струмознімального контакту 3 у вигляді щітки або движка, що ковзає по витках дроту, очищеного від ізоляції.

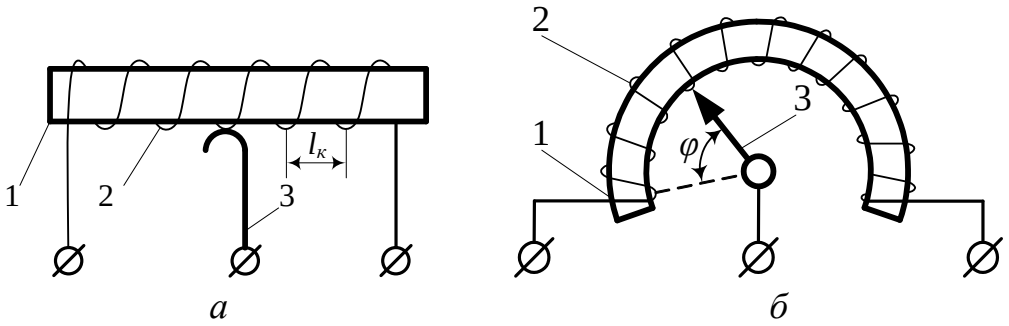


Рис. 2.4. Потенціометричні перетворювачі:

а – лінійний; б – кутовий; 1 – корпус; 2 – дріт; 3 – повзунок (струмознімач)

Каркас виконується з ізоляційного матеріалу і може мати форму стрижня, кільця, зігнутої пластини. Матеріал каркаса повинен зберігати свої розміри в широкому температурному діапазоні, умовах підвищеної вологи і хімічної забрудненості атмосфери. Крім того, каркаси повинні володіти високою теплопровідністю, що дозволяє збільшувати розсіювану в перетворювачі потужність. Як ізоляційний матеріал використовують гетинакс, текстоліт, кераміку або метал, покритий непровідним шаром оксиду.

Обмотку виконують ізольованим дротом виток до витка або із заданим кроком $l_к$. Матеріал обмотки повинен відповідати наступним вимогам: високий питомий електричний опір, висока корозійна стійкість, стабільність характеристик в часі, малий ТКО, велика міцність на розрив і стирання. Як обмотувальний дріт застосовують константан і манганін, а при роботі в умовах підвищених температур − залізно - і нікельхромові сплави. У особливо відповідальних або специфічних умовах роботи застосовують сплави з благородних металів: платини з іридієм, платини з паладієм і ін. Наприклад, добавка іридію до платини збільшує її твердість, зносостійкість, хімічну стійкість, корозійну стійкість. Діаметр дроту залежить від точності і опору перетворювача: 0,01...0,10 мм для давачів високого класу; 0,1...0,4 мм − для давачів низького класу. Обмотувальний дріт покривають шаром емалі або шаром оксидів.

Рухомий контакт (щітка, повзунок) виконують у вигляді двох-трьох паралельних дротів діаметром 0,1...0,2 мм, що декілька відрізняються по довжині (для прецизійних потенціометричних перетворювачів), або із спеціально профільованої пластини (щітки) з розрізами. Ширина контактної поверхні щітки має дорівнювати двом-трьом діаметрам дроту чутливого елементу.

Виготовляють щітку або з чистих металів (платини, срібла), або із сплавів (платини з іридієм або берилієм, фосфористої бронзи і ін.). Матеріал щітки має бути дещо м'якше за матеріал дроту, щоб дріт не перетирався. Щітка притискається до обмотки із зусиллям $(0{,}5...\ 15{,}0)\cdot 10^{-2}$ Н.

Допустима щільність струму в обмотці залежить від матеріалу дроту і умов його охолоджування. При використанні манганіну або константана робоча температура перетворювача може досягати 40...50 °С при щільності струму в обмотці близько 10 А/мм^2 для каркаса з пластикових матеріалів або 25...30 А/мм^2 для металевого каркаса. Використання обмотувального дроту з

благородних матеріалів допускає робочу температуру в межах 70...80 °С і щільність струму 40...50 А/мм^2 при металевому каркасі.

Розглянемо роботу перетворювача в режимі холостого ходу, коли опір навантаження $R_H \to \infty$. На практиці режим, близький до холостого ходу, має місце, наприклад, при подачі вихідної напруги перетворювача на підсилювач з дуже високим вхідним опором (наприклад на операційний підсилювач).

До затисків обмотки реостата підключається напруга $U_Ж$ постійного або змінного струму незмінного значення. При переміщенні повзунка вихідна напруга $U_{ВИХ}$ змінюється пропорційно вхідній величині l_x. Таким чином здійснюється перетворення переміщення в напругу (рис. 2.5).

Вихідна напруга перетворювача в режимі холостого ходу:

$$U_{ВИХ} = IR_x = U_Ж \frac{R_x}{R_П}, \qquad (2.2)$$

де $R_П$ – повний опір перетворювача; R_x – опір введеній частині потенціометра.

Якщо l_x – довжина обмотки потенціометра, то при постійному опорі дроту на одиницю довжини і рівномірному намотуванні

$$\frac{R_x}{R_П} = \frac{l_x}{l_n}. \qquad (2.3)$$

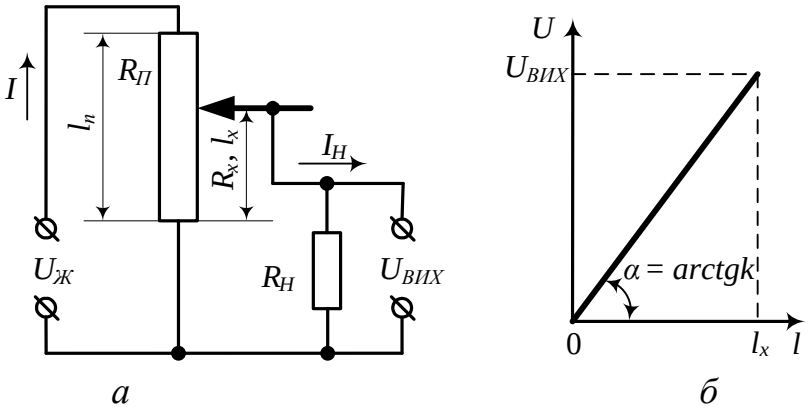


Рис. 2.5 Однотактний потенціометричний перетворювач:
а – розрахункова електрична схема; *б* – статична характеристика

Отже, в режимі холостого ходу статична характеристика потенціометричного перетворювача є лінійною залежністю такого вигляду:

$$U_{ВИХ} = kl_x, \quad 0 \le l_x \le l_n, \qquad (2.4)$$

де $k = \frac{U_Ж}{l_n}$ – коефіцієнт передачі.

Для перетворювача кутового переміщення (див. рис. 2.4, *б*) в режимі холостого ходу функції перетворення має вигляд:

$$U_{ВИХ} = k\varphi,$$

де φ − кут повороту повзунка від нульового положення.

Аналіз отриманих виразів для функцій перетворення показує, що статична характеристика лінійних потенціометрів за відсутності навантаження є прямою, що проходить через початок координат під кутом $\varphi = \text{arctg}\, k$ (рис. 2.5, *б*).

Як випливає з приведеної статичної характеристики, розглянутий перетворювач відноситься до *однотактних вимірювальних перетворювачів*, тобто він не реагує на знак вхідного сигналу. У ряді випадків необхідні перетворювачі, що враховують знак вхідного сигналу, − *двотактні вимірювальні перетворювачі*.

Їх можна побудувати на основі однотактних потенціометричних перетворювачів, якщо знімати вихідний сигнал з повзунка і середньої точки потенціометра або з діагоналі мостової схеми, утвореної двома потенціометричними давачами з середньою точкою.

Статична характеристика потенціометричного давача при зроблених вище допущеннях як і раніше визначатиметься виразом (2.4), тільки межі зміни l_x будуть іншими:

$$-\frac{l_n}{2} \le l_x \le \frac{l_n}{2}. \qquad (2.5)$$

Два можливі варіанти включення потенціометричних давачів за двотактною схемою приведено на рис. 2.6, *а, б*. Їх статичні характеристики відповідно 1 і 2 (рис. 2.6, *в*) мають різну крутизну. Це пояснюється тим, що при включенні перетворювачів за мостовою схемою (див. рис. 2.6, *б*), зміна вхідного сигналу відпрацьовується двома повзунками, що зміщуються в різні боки від середньої крапки, що приводить до появи подвоєної вихідної напруги в порівнянні з схемою, представленою на рис. 2.6, *а*.

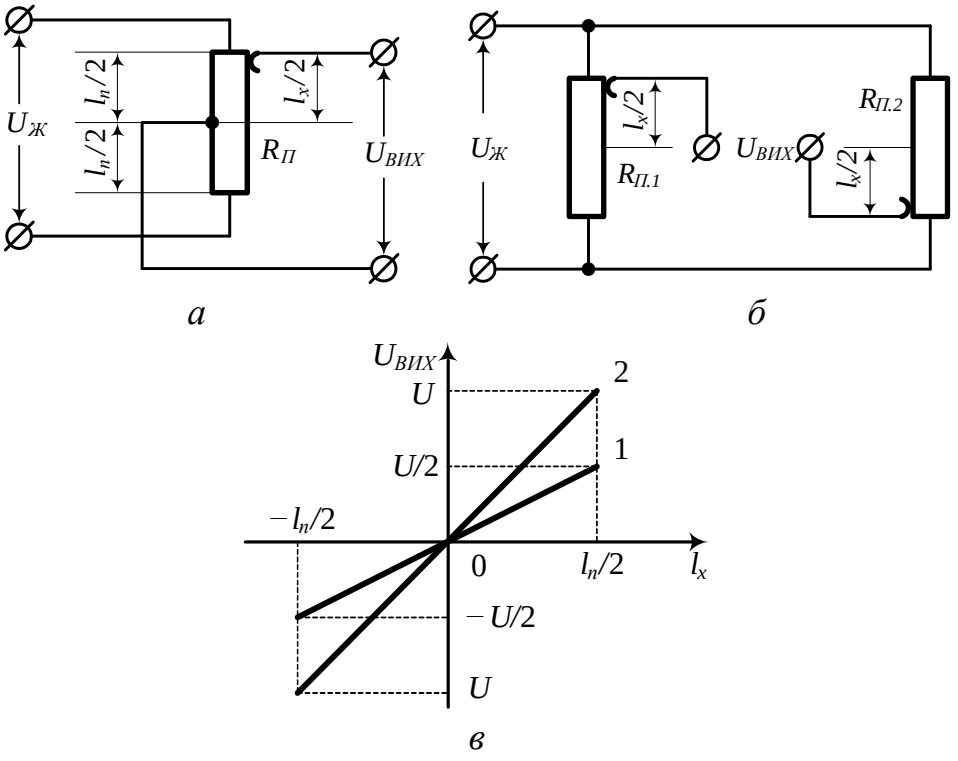


Рис. 2.6. Варіанти включення двотактних потенціометричних перетворювачів:

а – з використанням середньої точки; *б* – за мостовою схемою; *в* – статичні характеристики 1 і 2, що відповідають схемам включення

Реальні характеристики потенціометричних перетворювачів значно відрізняються від розглянутих ідеальних із-за різних похибок: дискретності вихідного опору; відхилення функції перетворення від розрахункової, викликаного непостійністю діаметру намотувального дроту і його питомого електричного опору; зміни температури перетворювача; впливи опору навантаження і інших факторів.

При переміщенні повзунка опір включеної частини потенціометра змінюється дискретно з кроком, рівним опору одного витка:

$$\Delta R = R_П/w, \tag{2.6}$$

де $R_П$ − опір потенціометричного перетворювача; w − кількість витків його обмотки.

Відповідно змінюється і вихідна напруга. Це явище визначає два чинники: поріг чутливості і зону нечутливості. Якщо їх розглядати щодо вхідного переміщення, то чисельно вони дорівнюватимуть діаметру дроту обмотки типу «виток до витка» або кроку намотування $l_к$ при розташуванні витків із зазором.

Статична характеристика з урахуванням дискретності зміни опору має ступінчастий вигляд (рис. 2.7.). Якщо за ідеальну характеристику прийняти пряму, що проходить через середини сходинок, то абсолютна погрішність дискретності або зона нечутливості залежно від форми представлення характеристики (у функції опору, переміщення або напруги) визначатиметься виразами:

$$\Delta R = R_П/2w;\ \Delta l_x = l_n/2w;\ \Delta U = U_Ж/2w. \tag{2.7}$$

Відповідно вирази для відносних похибок наберуть вигляду:

$$\delta R = \delta l_x = \delta U_Ж = 1/2w. \tag{2.8}$$

У реальних конструкціях лінійних реостатних перетворювачів кількість витків складає близько 2000 (мінімально близько 200), а похибка дискретності відповідно дорівнює 0,02...0,03 %. Сумарна похибка, викликана непостійністю електричних параметрів перетворювача, досягає 0,03...0,10 %. Температурна похибка, визначувана перш за все ТКО намотувального дроту, не перевищує зазвичай 0,1 % на 10 °С.

Найбільшу похибку може зумовити неправильно вибраний режим роботи перетворювача – малий опір навантаження. Потенціометричний перетворювач з підключеним навантаженням $R_Н$ (рис. 2.8, *а*) можна представити еквівалентною схемою (рис. 2.8, *б*) недовантаженого перетворювача. Для неї справедливі наступні співвідношення:

$$U_{ВИХ} = I\frac{R_Н R_x}{R_Н + R_x};\ I = \frac{U_Ж(R_Н + R_x)}{(R_Н + R_x)(R - R_x) + R_Н R_x}. \tag{2.9}$$

Підставляючи другий вираз у перший, отримуємо:

$$U_{ВИХ} = \frac{U_Ж R_Н R_x(R_Н + R_x)}{(R_Н + R_x)[(R_Н + R_x)(R_Н - R_x) + R_Н R_x]} = \frac{U_Ж R_Н R_x}{R_П R_Н + R_П R_x - R_x^2}. \tag{2.10}$$

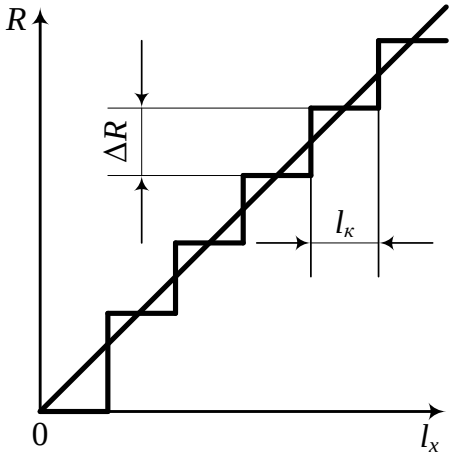


Рис. 2.7 Статична характеристика потенціометричного перетворювача з урахуванням опору намотувального дроту

Як видно з отриманого виразу, статична характеристика $U_{ВИХ} = f(R_x)$ залежить від опору навантаження і визначає методичну погрішність. Істотне значення має співвідношення R_H і $R_П$. Можна розглянути два випадки: $R_H >> R_П$; R_H сумірно з $R_П$ потенціометра.

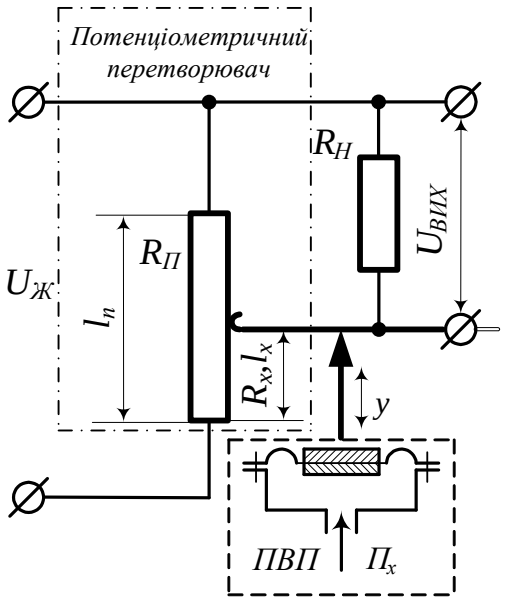
Вираз (2.10) можна представити у вигляді:

$$U_{ВИХ} = \frac{U_Ж R_x}{R_П + (R_П / R_H)R_x - R_x^2 / R_H}. \qquad (2.11)$$

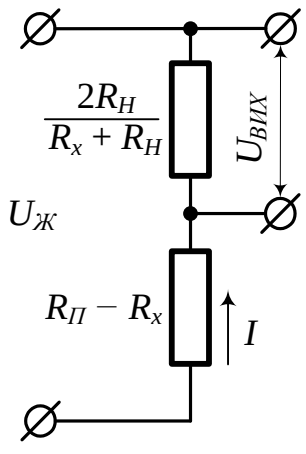
Для $R_H >> R_П$ величинами $(R_П/R_H)R_x$, R_x^2/R_H можна нехтувати в порівнянні з $R_П$.

Тоді

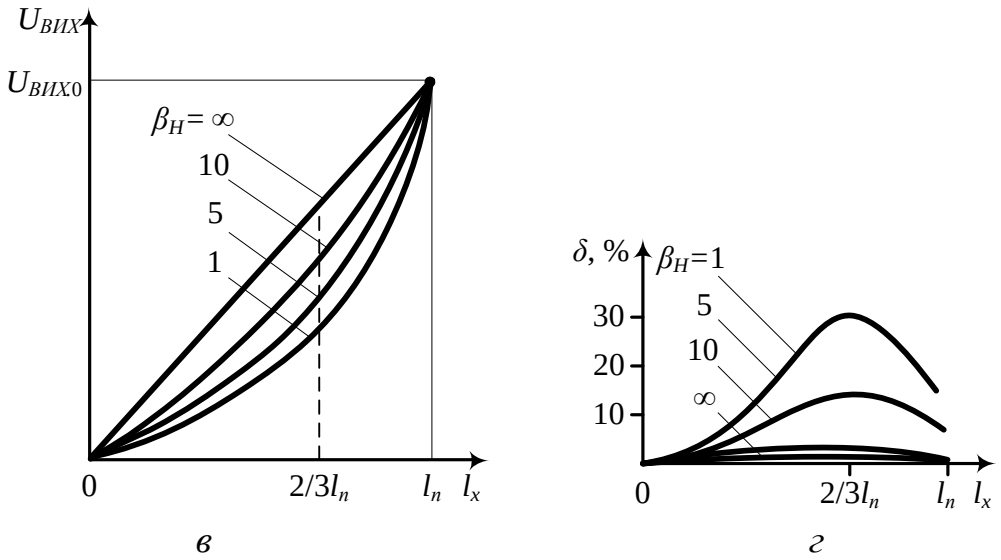
$$U_{ВИХ} = (U_Ж/R_П)R_x = U_{ВИХ.0}. \qquad (2.12)$$



а



б



в *г*

Рис. 2.8. Потенціометричний вимірювальний перетворювач:
а – схема увімкнення з навантаженням; *б* – еквівалентна схема;
в – статичні характеристики; *г* – графіки похибок

Аналогічний результат можна отримати, прийнявши $R_Н > R_П$ і прийти до режиму холостого ходу, тобто відсутності навантаження на виході перетворювача.

Для $R_Н = R_П$ абсолютна погрішність від неспівпадання ідеальної і реальної статичних характеристик визначиться виразом:

$$\Delta U = U_{ВИХ.0} - U_{ВИХ} =$$

$$= \frac{U_Ж R_x}{R_П} - \frac{U_Ж R_Н r}{R_П R_Н + R_П R_x - R_x^2} = U_Ж \frac{R_x^2 (R_П - R_x)}{R_П^2 R_Н + (R_П^2 R_x - R_П R_x^2)} =$$

$$= U_Ж \frac{R_x^2 (R_П - R_x)}{R_П^2 R_Н}. \qquad (2.13)$$

Вираз (2.13) отриманий, виходячи з умов $R_П^2 R_x = R_П R_x^2$ і $(R_П^2 R_x - R_П R_x^2) = 0$.

Відносна похибка

$$\delta = \Delta U / U_Ж = R_x^2 (R_П - R_x) / R_П^2 R_Н. \qquad (2.14)$$

Щоб визначити максимальну похибку, прирівняємо похідну $d\delta/dR_x$ до нуля:

$$d\delta/dR_x = (2R_x R_П - 3R_x^2)/(R_П^2 R_Н) = 0.$$

що справедливо за умови $2R_x R_П - 3R_x^2 = 0$.

Звідки отримуємо:

$$R_x = 2R_П/3. \qquad (2.15)$$

Отже, перетворювач має найбільшу похибку при відхиленні повзунка на 2/3 загальної довжини l_n. Підставивши вираз (2.15) у (2.14), отримаємо формулу для розрахунку максимальної погрішності:

$$\delta_{\max} = \frac{r^2(R-r)}{R^2 R_H} = \frac{\frac{4R^2}{9}(R-\frac{2R}{3})}{R^2 R_H} = \frac{4}{27\beta_H}, \qquad (2.16)$$

де $\beta_H = R_H / R_П$ − коефіцієнт навантаження.

Як випливає з (2.16) і приведених статичних характеристик перетворювача при різних коефіцієнтах навантаження β (рис. 2.8, *в, г*), із збільшенням опору навантаження погрішність зменшується. У загальному випадку необхідно, щоб коефіцієнт навантаження був якомога більше, проте на практиці його вибирають в межах 10... 100. Необхідно відзначити також, що вихідна напруга перетворювача при підключенні навантаження падає із-за шунтування опором R_H частини R_x опору потенціометра $R_П$.

Оскільки індуктивний і ємкісний опори резистивних перетворювачів

переміщення вельми малі, і їх можна не брати до уваги до частот живлячої напруги змінного струму близько декількох десятків кілогерц. Тому при розгляді резистивних перетворювачів як динамічної ланки системи автоматичного керування необхідно враховувати також опір навантаження вимірювального (підсилювального) кола. При активному навантаженні резистивний перетворювач є безінерційною ланкою.

При активно-реактивному навантаженні починає виявлятися інерційність перетворювача і його динамічні характеристики набувають динамічних характеристик аперіодичної ланки першого порядку.

Разом з лінійними перетворювачами в системах автоматичного керування широко застосовують *функціональні перетворювачі.*

Для отримання функціональних потенціометричних перетворювачів використовують такі способи: зміна діаметру дроту уздовж намотування; зміна кроку намотування; застосування каркаса певної конфігурації; шунтування ділянок лінійного потенціометра опорами різних значень. Перші два способи зв'язано з технологічними труднощами і на практиці не застосовуються.

До достоїнств дротяних потенціометричних перетворювачів можна віднести: простоту конструкції; малі розміри і масу; можливість отримання необхідних функціональних залежностей відносно простими засобами; отримання високоточних лінійних статичних характеристик; стабільність характеристик; малий перехідний опір; можливість роботи на змінному і постійному струмі; малий ТКО.

Недоліками цих елементів слід вважати: наявність ковзаючого контакту, який може стати причиною відмови із-за окислення контактної доріжки, перетирання витків або відгинання повзунка; порівняно невеликий коефіцієнт перетворення і високий поріг чутливості; наявність шуму; схильність до електроерозії під дією імпульсних розрядів; обмежену швидкість лінійного переміщення або обертання (до 100...200 об/хв) струмознімача унаслідок його вібрацій при переході з витка на виток і підвищення при цьому рівня динамічного шуму; обмежену частоту змінного струму (до 1000 Гц); низьку зносостійкість.

2.2.2. Тензорезисторні первинні вимірювальні перетворювачі

Тензорезисторні первинні вимірювальні перетворювачі (тензорезистори, тензодавачі) застосовують для вимірювання *тиску рідини і газу*, а також для вимірювання пружних деформацій матеріалів: *вигинів, скручування, зусиль, переміщень і прискорень* і т. д.

Принцип дії тензорезисторів засновано на явищі тензоефекту, що полягає в зміні активного опору провідникових і напівпровідникових матеріалів при їх механічній деформації.

У техніці вимірювання неелектричних величин тензорезистори використовуються за двома напрямками.

Перший напрямок – використання тензоефекту провідника, що перебуває в стані об'ємного стискування, коли природним вхідним сигналом перетворювача є тиск газу, що оточує його, або рідини. На цьому принципі будуються манометри для вимірювання високого і надвисокого тиску, перетворювачі яких являють собою котушку з дроту (зазвичай манганинового) або напівпровідниковий елемент (найчастіше германієвий або кремнієвий), поміщені в область вимірюваного тиску (рідини або газу).

Другий напрямок – використання тензоефекту розтягуваного або стискуваного тензочутливого матеріалу. При цьому тензорезистори застосовуються або у вигляді «вільних» перетворювачів, або у вигляді наклеюваних.

Характеристикою тензоэффекта матеріалу служить ***коефіцієнт тензочутливості k***, який визначається як відношення зміни опору до зміни довжини провідника:

$$k = \varepsilon_R / \varepsilon_l, \qquad (2.17)$$

де $\varepsilon_R = \Delta R/R$ − відносна зміна опору тензорезистора; $\varepsilon_l = \Delta l/l$ − відносна деформація (зміна розміру) тензорезистору; ΔR − приріст опору при зміні довжини l на Δl.

Властивість (2.17) більшою чи меншою мірою притаманна і провідникам, і напівпровідникам.

При деформації твердих тіл зміна їх довжини пов'язана із зміною об'єму, причому величина зміни об'єму в зоні пружних деформацій для кожного матеріалу постійна і характеризується коефіцієнтом Пуассона

$$\mu = -\varepsilon_b / \varepsilon_l, \qquad (2.18)$$

де $\varepsilon_b = \Delta b / b$ – відносна величина поперечної деформації; b – поперечний розмір провідника квадратного перетину (або радіус для круглого).

В цьому випадку

$$\Delta R = \rho\Delta l /\mathrm{S} - \rho\Delta l S / S^2 \qquad (2.19)$$

і

$$\Delta R/R = \Delta l/l - \Delta S / S = \Delta l/l - 2\Delta b / b. \qquad (2.20)$$

Враховуючи, що

$$\Delta b / b = -\mu\Delta l/l, \qquad (2.21)$$

отримуємо:

$$\Delta R/R = (1 + 2\mu)\Delta l/l, \qquad (2.22)$$

а коефіцієнт тензочутливості

$$k = \varepsilon_R / \varepsilon_l = 1 + 2\mu. \qquad (2.23)$$

Коефіцієнт Пуассона μ для металів має значення 0,24…0,4. Отже, значення коефіцієнта тензочувствительности k для більшості металів не повинно виходити за межі 1,48…1,8. Проте значення k для різних матеріалів, визначені експериментально, виходять за вказані межі, як в ту, так і в інший бік.

Коефіцієнт *тензочутливості* k металів, що найчастіше використовуються для тензорезисторов, близький до двох: для константана – 2; для ніхрому – 2,2; для хромеля – 2,5.

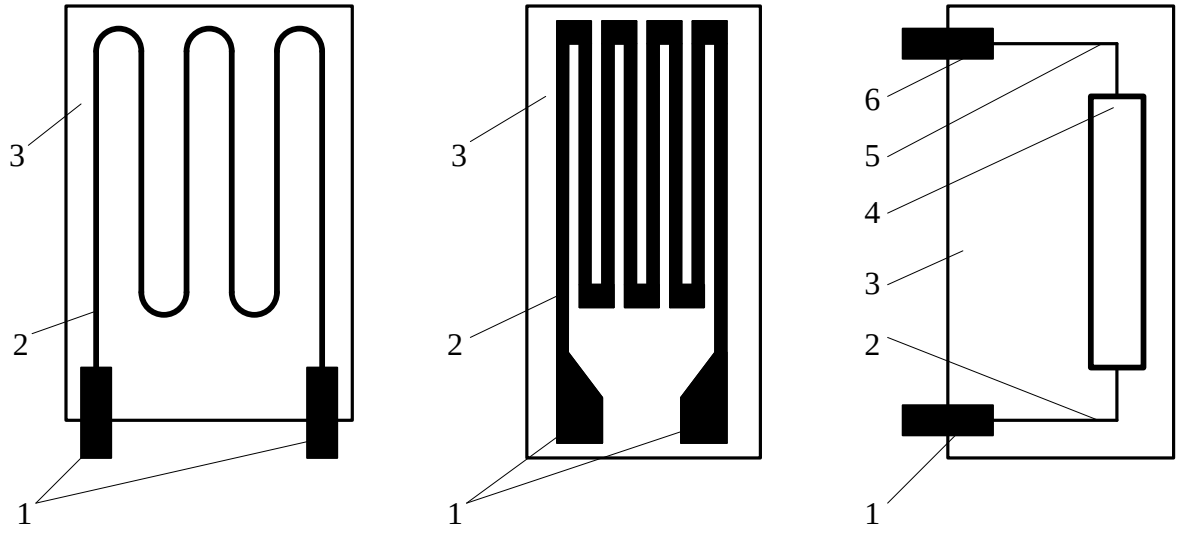
Для напівпровідникових матеріалів $k = \delta\rho/\varepsilon_l$ ($\delta\rho$ − відносний приріст питомого опору ρ матеріалу при деформації), і він набагато більший, ніж у металів. Наприклад, для германію $k \approx 100$. Проте напівпровідникові матеріали характеризуються малими механічною міцністю і стабільністю в порівнянні з металами.

Як тензорезистивний матеріал можна використовувати сплави з малим ТКО (манганін, константан, ніхром, нікелін), платиносрібні і платиновольфрамові напівпровідникові матеріали (германій, кремній). Нині застосовують провідникові та напівпровідникові тензорезистори.

Провідникові тензорезистори. Вони розділяються на дротяні і фольгові (рис. 2.9, *а, б*).

Провідникові тензорезистори бувають трьох типів: *дротові на паперовій* типу 2ПКБ) і *плівковій* (типу 2ПКП) *основі, фольгові* прямокутні (типу 2ФКПА і 2ФКПД); *розеточні* (типу 2ФКРВ, 2ФКРГ).

Найкращій вітчизняний матеріал для виготовлення провідникових тензорезисторів, які використовують за температур нижчих від 180 °*C*, *константан* (45 % Ni, 55 % Cu) має коефіцієнт тензочутливості k_T =2,0...2,1.



а *б* *в*

Рис. 2.9. Тензорезисторні перетворювачі:

а – дротяний: 1 – виводи; 2 – дротяна гратка; 3 – ізоляційна (паперова) підкладка; *б* – фольговий: 1 – розпаювальні площинки; 2 – металева фольга; 3 – ізоляційна підкладка; *в* – напівпровідниковий: 1, 6 – металеві смужки; 2, 5 – вивідні провідники; 3 – ізоляційна (паперова) підкладка; 4 – пластинка напівпровідника

Конструкція поширеного типу дротяного тензорезистора приведена на рис. 2.9, *а*. Вона є смужкою тонкого паперу або лаковою плівкою 3, на яку наклеюються зигзагоподібно укладені «грати» з тонкого дроту 2 діаметром 0,02…0,05 мм. До кінців дроту приєднуються (паянням або зваркою) вивідні мідні провідники 1. Зверху перетворювач покривається захисним шаром лаку. Резистори на плівці з клею БФ-2 працюють в діапазоні температур від −40 до 70 °С, а на бакелітовому лаку − до 200 °С. Для вищих температур використовують спеціальні високотемпературні клеї або цементи.

Такий перетворювач, приклеєний до випробовуваної деталі, сприймає деформації її поверхневого шару. Природною вхідною величиною наклеюваного тензоперетворювача є деформація поверхневого шару деталі, на яку він наклеєний, а вихідною – зміна опору перетворювача, пропорційна цій деформації.

Вимірювальною базою перетворювача є довжина деталі, займана дротом. Найчастіше використовуються перетворювачі з базами 5…20 мм, що володіють опором 30…500 Ом. Їх номінальний робочий струм, який визначається умовами відведення втрат енергії, що виділяються в них, перебуває в межах десятків міліампер. Максимально допустимі відносні деформації не перевищують 0,3 %.

Тензорезистор наклеюють на поверхню випробовуваної деталі так, щоб його подовжня вісь була розташована у напрямі вимірюваної деформації, тобто щоб можливі деформації деталі відбувалися уздовж петель резистора. Це дозволяє точніше вимірювати лінійні деформації.

Оскільки зміна опору тензорезисторів, викликана деформацією, вельми мала і коливається від одиниць міліом до декількох десятих доль ома, то для вимірювань застосовують високочутливі потенціометричні і мостові схеми. Щоб підвищити чутливість тензорезисторів, їх можна включати в два і навіть чотири плеча мостової схеми.

Характеристика дротяних тензорезисторів в межах пружної деформації близька до лінійної і визначається виразом:

$$\Delta R = R_{П} k \varepsilon_l = (\rho k / F) \Delta l, \qquad (2.24)$$

де F − площа перетину дроту.

Відхилення від лінійності характеристики не перевищує 0,1 %. Чутливість дротяного тензорезисторавизначається виразом:

$$k_S = d(\Delta R) / d(\Delta l) = \rho k / F. \qquad (2.25)$$

Фольгові тензорезистори. Фольгові перетворювачі (рис. 2.9, *б*) досконаліші, ніж дротяні тензорезистори. Фольгові тензорезистори являють собою тонку плівку 3, на яку нанесено фольгову тензочутливу гратку 2 з константану завтовшки 4...12 мкм, покриту лаком. Завдяки більшій площі контакту смужок фольгового тензорезистора з об'єктом вимірювання його тепловіддача значно вища, ніж у дротяного, що дозволяє збільшити струм, що протікає через резистор, до 0,5 А, і тим самим підвищити чутливість тензоперетворювача. Інша гідність фольгових тензорезисторов полягає в можливості виготовлення граток складного профілю, які якнайповніше задовольняють умовам вимірювань.

Тензорезистори з фольги виготовляють за такою самою технологією, що й друковані плати.

Це дозволяє:

зменшити розміри та забезпечити більшу точність вимірювань в умовах, коли є градієнт деформацій;

оптимізувати рисунок контура резистора, зокрема потовщити поперечні частини, знизивши тим самим їх опір, а отже, і вплив поперечних деформацій;

збільшити бокову поверхню тензорезистора зі збереженням опору, забезпечивши цим надійніший тепловий контакт із середовищем та краще відтікання джоулевої енергії вимірюваного струму;

зменшити похибки, зумовлені зазором між провідним шаром і поверхнею зразка, особливо під час вимірювання вигіну, позаяк загальна товщина фольги та підкладки незначна (разом 20...35 мкм).

Фольговим тензорезисторам властиві такі метрологічні характеристики:

лінійність і гістерезис − від ±0,2 до ± 1 % від діапазону вимірювання;

похибки − 0,5...2 % від діапазону вимірювання;

частотна характеристика − власна частота від 1 до 100 кГц і більше (залежно від типу ЧЕ);

вихідний сигнал − кілька мілівольтів (200 мВ) у діапазоні вимірювання;

температурний діапазон працездатності −40...+70 °С.

Перевагами фольгових тензорезисторів є: висока точність; мала чутливість до вібрацій та поперечної деформації, а за наявності теплової компенсації − до температури.

Їм властиві такі вади: слабкий вихідний сигнал; можлива пластична деформація; обмежений ресурс через стирання клеїв і їх плинність;

В діапазоні пружних деформацій повзучість більшості тензорезисторів не перевищує 0,5...1 % за першу годину після наклеювання і зростає до 1.5...2 % через тривалий час після цього.

Механічний гістерезис, як і повзучість, зумовлено пружною недосконалістю підкладки та клею; чисельно його визначають як зведену до входу різницю значень вихідного опору для одного й того ж значення деформації за умови, що це значення деформації досягається за плавного її зростання та плавного зменшення. Для різних типів тензорезисторів механічний гістерезис становить 0,5...5 %.

Напівпровідникові (п'єзорезистивні) тензорезистори. Залежно від способу виготовлення їх поділяють на вирізані та дифузійні.

Вирізані тензорезистори являють собою вирізану з монокристала кремнію (рис. 2.9, *в*) пластинку 4 завдовжки 5...10 мм та завширшки 0,2...0,8 мм. До її торців приварено вивідні провідники 2, 5 (зазвичай із золотого дроту), які сполучають пластинку напівпровідника з виводами у вигляді металевих смужок 1, 6. Діапазон номінального опору напівпровідникових тензоперетворювачів – 50...800 Ом. Пластинку вирізають паралельно діагоналі кристалічного куба для кремнію *р-типу* чи паралельно його ребру

для кремнію *n-типу*. Такі тензорезистори майже не мають поперечної чутливості.

Дифузійні тензорезистори отримують дифузією певних домішок у кремнієву підкладку. Додавання в кремній елементів V групи таблиці Менделєєва (*P*, *Sb*) дає провідність *n-типу*, а додавання елементів III групи (*Ga*, *In*) − провідність *p-типу*. Виготовляються такі тензорезистори як у вигляді одиночних приклеюваних тензорезисторів, які є функціональним аналогом дротяних, так і у вигляді інтегральних тензомодулів, у яких пружний елемент (мембрана) виготовлений з монокристалічного напівпровідника (зазвичай кремнію), на якому методом дифузії формують інтегральну тензочутливу схему. У такому тензомодулі проміжної ланки між пружним елементом і тензорезистором (клею) не буває. Останнім часом набуло поширення застосування мостових тензорезистивних структур, які являють собою напівпровідникові тензорезистори, з'єднані монолітно в схему одинарного моста. Побудовані на базі мостових тензоструктур ПВП точніші за ПВП з одиночними напівпровідниковими тензорезисторами і більш технологічні порівняно з тензомодулями.

П'єзорезистивні тензорезистори мають такі метрологічні характеристики: лінійність і гістерезис – від ±0,2 до ± 2 % від діапазону вимірювання, похибки – 0,1...0,5 % від діапазону вимірювання, частотні характеристики – власну частоту від 50 кГц до 1 Мгц (залежно від діаметра та товщини мембрани); вихідний сигнал досягає 100 мВ.

Напівпровідникові тензорезистори мають ряд суттєвих переваг: їх чутливість в 50...60 разів перевищує чутливість дротяних, розміри істотно менші, рівень вихідного сигналу у ряді випадків достатній для використання без складних і дорогих підсилювачів. Основною їх відмінністю від дротяних є велика (до 50 %) зміна опору тензоперетворювача при деформації.

До недоліків напівпровідникових тензорезисторів слід віднести малі механічну міцність і гнучкість. Реалізувати велику тензочутливість цих тензорезисторів виявляється досить складно із-за нелінійності характеристики, високій чутливості до дії зовнішніх умов і суттєвого розкиду параметрів від зразка до зразка.

Властивості напівпровідникових і провідникових (металевих) перетворювачів значно розрізняються: чутливість напівпровідникових перетворювачів, яка в десятки разів перевищує чутливість дротяних тензорезисторів, може бути як додатною, так і від'ємною, а також змінюватись у значних межах.

Похибки тензорезисторів можуть бути викликані змінами температури, недостатніми опором ізоляції і вологостійкістю, якістю наклеювання, наявністю поперечної деформації (для наклеюваних перетворювачів).

Похибки приладів з дротяними, фольговими і плівковими тензорезисторами тісно пов'язані з градуюванням цих приладів. Якщо немає можливості градуювати безпосередньо робочий перетворювач, то похибка, обумовлена неідентичністю і якістю приклеювання робочих і градуйованих тензорезисторів, може бути 1…1,5 % навіть при вельми ретельному

приклеюванні, а загальна похибка приладу (включаючи похибку підсилювача, покажчика і ін.) може досягати 10…15 % при динамічних вимірюваннях.

Особливо великі похибки можуть внести зміни температури і не лише із-за відходу параметрів матеріалу, але і із-за появи додаткової механічної

напруги, викликаних різницею температурних розширень матеріалів тензорезистора і деталі.

Проте, застосовуючи додаткові заходи (додаткову установку нуля перед кожним вимірюванням, калібрування і т. д.), погрішність вимірювань можна довести до 0,2...0,5 % при статичних і до 1...1,5 % при динамічних вимірюваннях.

Температурна нестабільність – вплив температури довкілля на основні параметри тензорезисторів – полягає, з одного боку, в зміні опору тензорезистора за рахунок його ТКО, а з другого – в появі додаткових механічних напружень, зумовлених різницею температурних коефіцієнтів лінійного розширення чутливого елементу тензорезистора та досліджуваної деталі.

Оскільки відносна зміна опору тензорезистора від вимірюваної деформації дуже мала (зазвичай менша за 1 %), то температурні зміни можуть бути причиною дуже високих похибок. Тому у вимірювальних колах з тензорезисторами потрібно передбачати температурну компенсацію.

До переваг тензорезисторів можна віднести незначну масу, малі розміри, простоту конструкції, можливість вимірювання статичних і динамічних процесів; до недоліків – відносно невисоку чутливість, можливість лише разового використання (оскільки він руйнується при від'єднанні від деталі),

необхідність використання мостової вимірювальної схеми і компенсації температурних дій.

Розрахунок тензорезисторов зводиться до визначення допустимої потужності розсіяння (а отже, і допустимого значення струму при даному опорі) при вибраних розмірах тензорезистора або навпаки – до визначення розмірів тензорезистора, необхідних для забезпечення заданої потужності. Потужність розсіяння P в тензорезисторе, обмежена його нагрівом, що викликає появу підвищених значень погрішності. При тепловому контакті тензорезистора з деталлю через шар і підкладку відводиться в 200…300 разів більший тепловий потік, ніж при тепловіддачі тензорезистора в навколишнє повітря.

Необхідні для розрахунку значення питомого теплового навантаження $P_{пит} = P / S_0$ більшості використовуваних зараз дротяних, фольгових і напівпровідникових тензорезисторов (з потужністю від 25 до 630 мВт і повною площею, займаними гратами, від 0,9 до 240 мм^2) коливаються в дуже вузьких межах $P_{пит}$ = 26…28 кВт/м^2 (або мВт/мм^2). Лише у окремих випадках, використовуючи дуже тонку підкладку, вдається досягти $P_{пит}$ = 30 мВт/мм^2, а використовуючи як підкладку тонку плівку, отримати $P_{пит}$ = 38…39 мВт/мм^2.

Допустиме значення струму $I_{доп}$ через тензорезистор визначається із співвідношення $P = I^2R = P_{пит}S_0$. Так, наприклад, для дротяних тензорезисто-

ров з базою довжиною l, з n проводів в гратах з діаметром d, виготовлених з матеріалу з питомим опором ρ:

$$S_0 = \frac{\pi d}{2} nl\,; \quad R = \frac{4nl\rho}{\pi d^2} \tag{2.26}$$

і допустиме значення струму

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{P_{пит} S_0}{R}} = \sqrt{\frac{P_{пит} \pi^2 d^3}{8\rho}}\,. \tag{2.27}$$

Для константановой дроту $\rho = 0{,}46 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, тоді при $P_{пит} = 27$ кВт/м^2 допустиме значення струму

$$I_{доп} = \sqrt{7{,}3 \cdot 10^{10} d^3}\,, \tag{2.28}$$

де $I_{доп}$ в амперах і d в метрах, або, виражаючи $I_{доп}$ в міліамперах і d в міліметрах, отримаємо: $I_{доп} = \sqrt{0{,}073 d^3}$.

Схеми вмикання тензорезисторів. Найчастіше тензорезисторні перетворювачі вмикають у схему незрівноваженого моста (рис. 2.10). Якщо опір навантаження R_H достатньо великий (режим холостого ходу), то вихідна напруга моста

$$U_x = \frac{UR_1}{R_1 + R_2} - \frac{UR_3}{R_3 + R_4} = U[R_1R_4 - R_2R_3)/(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)]$$

де U - напруга живлення; R_1,R_2 - тензорезистори з однаковим опором.

Якщо немає вимірюваної деформації, тензорезистори R_1 і R_2 мають однаковий опір: $R_{10} = R_{20} = R_0$. Зазвичай вибирають однаковими R_3 і R_4. Тоді у разі, коли деформації тензорезисторів немає, U_x, = 0. За деформації тензорезисторів, коли $R_1 \neq R_2$, вихідна напруга моста буде пропорційною різниці опорів тензорезисторів:

$$U_x = U(R_1 - R_2)/[2(R_1 + R_2)]$$

Мостова схема, показана на рис. 2.10, диференціальна, тому в ній компенсуються адитивні похибки. Із застосуванням мостової схеми тензорезисторні прилади будуються за диференціальною схемою першого (один із терморезисторів сприймає деформацію, другий – ні) або другого (тензорезистори піддають однаковому за величиною, але протилежному за напрямом деформуванню: якщо один з них розтягується, то другий, навпаки, стискається) типу. При цьому тензоперетворювачі перебувають в однакових температурних умовах.

У разі використання диференціальної схеми першого типу, тобто якщо

$$R_1 = R_0 + \Delta R \; i \; R_2 = R_0$$

вихідна напруга U_x і чутливість S_x схеми в режимі холостого ходу становитимуть:

$$U_x = U\Delta R/(4R_0)$$

$$S_x = \frac{U_x}{\frac{\Delta R}{R_0}} = U/4$$

У разі використання диференціальної схеми другого типу, коли

$$R_1 = R_0 + \Delta R, R_2 = R_0 - \Delta R$$

вихідна напруга і чутливість у режимі холостого ходу збільшуються вдвічі (якщо $R_H \neq \infty$, вихідна напруга і чутливість будуть меншими від отриманих значень).

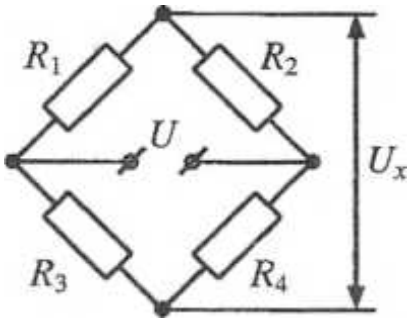


Рис. 2.10. Вимірювання опору тензорезисторів за допомогою незрівноваженого моста

Якщо напруга живлення моста U не стабілізована, то за її варіації можливе виникнення мультиплікативної похибки. Для запобігання цьому використовують компенсаційний метод вимірювання вихідної напруги моста (рис. 2.11).

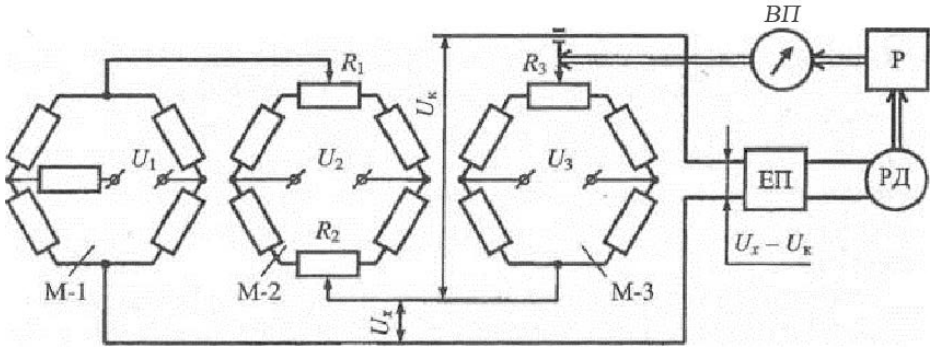


Рис. 2.11. Вимірювання опору тензорезисторів за допомогою мостової компенсаційної схеми

За нульового значення вимірюваної величини напруга тензорезисторного моста М-1 компенсується за допомогою моста М-2 − його підстроювальними резисторами R_1 і R_2. Сумарна напруга U_x буде пропорційною вимірюваній величині.

Міст М-3 служить для компенсації цієї напруги. Його вихідна напруга U_K напрямлена зустрічно напрузі U_x. Різниця напруг $U_x - U_K$ підсилюється ЕП і подається на РД. При цьому ротор двигуна, обертаючись, через редуктор P переміщує повзунок реохорда R_3 та покажчик вторинного приладу *ВП* відносно шкали. Повзунок реохорда R_3 переміщується так, щоб зменшувалась різниця $U_x - U_K$. Ротор РД зупиняється, коли $U_X - U_K = 0$. При цьому повзунок реохорда R_3 займає положення, що відповідає значенню напруги

U_x, а покажчик приладу – положення, що відповідає значенню вимірюваної величини.

Мости М-1, М-2, М-3 живляться від різних обмоток трансформатора одного джерела змінної напруги. У разі нестабільності джерела живлення напруги U_1, U_2, U_3 змінюються пропорціонально, тому рівність $U_x = U_K$ не порушується. Не змінюються і показання *ВП*. Основна похибка вимірювання становить ±0,5 % від нормувального значення $2\Delta R_{max}$ (тут ΔR_{max} − максимальне значення приросту опору плеча моста).

Похибки тензометричних перетворювачів. Тензорезистори можна використовувати або для вимірювання механічних напружень і деформацій, або для вимірювання інших механічних величин: сили, тиску, прискорення та інших, якщо деформація є проміжною величиною перетворення. У першому випадку для градуювання тензорезисторів з партії відбирають декілька зразків і наклеюють на зразкову балку. За допомогою гир у балці створюються певні деформації ε. За значеннями деформацій та відповідних їм опорів розраховують чутливість S наклеєних тензорезисторів:

$$S = \left[\frac{R - R_0}{R_0}\right] / \varepsilon$$

де R, R_0 − опори тензорезистора відповідно під дією деформації ε і без неї.

Це значення беруть як номінальне для всієї партії. Чутливість інших тензорезисторів тієї ж партії може відрізнятися від номінальної на 2...10%.

У другому випадку тензорезистори є постійними перетворювачами, що входять до складу ПВП. Відхилення їх чутливості від номінального значення враховують під час градуювання приладу, а сумарна похибка приладу значно менша, ніж у першому випадку, і становить 0,2. ..0,5 %.

Похибку можуть спричинити температурні зміни опору перетворювача. У разі змінювання температури він змінюється як унаслідок зміни питомого опору матеріалу, так і внаслідок зміни натягу через різні температурні коефіцієнти подовження тензорезистора $\beta_т$ і деталі $\beta_д$, на яку він наклеєний. Повна зміна опору

$$\Delta R_t = R_0\left[a + S\left(\beta_д - \beta_т\right)\right]\Delta t$$

де R_0 – опір тензорезистора за нормальної температури; S – його чутливість; а – температурний коефіцієнт опору; Δt – зміна температури.

Температурний коефіцієнт опору константану можна змінювати, змінюючи його термообробку. Завдяки цьому тензорезистори можна виготовляти так, щоб у разі наклеювання на певний матеріал його опір не залежав від температури. Такі тензорезистори називають *термокомпенсованими.*

Температурна похибка провідникових тензорезисторів переважно має адитивний характер; для її компенсації використовують диференціальну схему підключення тензорезисторів першого типу з двома або чотирма тензорезисторами.

Для вимірювання інших величин, наприклад сили, тиску, використовують диференціальну схему другого типу. При цьому на силовимірювальну пружину з різних боків наклеюють два тензорезистори так, щоб у разі згинання пружини під дією сили один з них розтягувався, другий − стискався. В обох випадках температурні умови й температурні зміни опорів тензорезисторів однакові. Тензорезистори вмикають у суміжні плечі моста, і це компенсує температурну похибку. Для збільшення чутливості на силовимірювальну пружину можна наклеїти чотири тензорезистори, причому перетворювачі, що сприймають деформації одного знака, потрібно підключати до протилежних плечей моста.

Відносно новим типом тензометричних ПВП є *кварцові п'єзорезонансні тензометричні ПВП* (більш поширена скорочена назва *кварцові тензодатчики),* що особливо набули поширення у різноманітних ваговимірювальних пристроях.

Кварцовий тензометричний ПВП має частотний вихідний сигнал, велику тензочутливість і високий ступінь лінійності характеристики перетворення. При цьому процес виготовлення кварцових п'єзоелементів і виробництво на їхній основі тензометричних ПВП не поступаються за технологічністю тензорезисторним ПВП.

Кварцові цифрові тензометричні ПВП мають убудований мікроконтролер, який дозволяє виконувати масштабування, цифрову фільтрацію та коригування параметрів вимірюваного сигналу. Зазвичай у таких ПВП використовується інтерфейс зв'язку типу RS-232.

Первинні вимірювальні перетворювачі ваги з тензорезисторами – натепер найточніші силовимірювальні пристрої, що застосовуються для зважування різних вантажів масою від часток грамів до тисяч тонн. Ваги, оснащені цими ПВП, допускаються до тарування, оскільки їх похибки відповідають законодавчо встановленим діапазонам похибок торгових ваг (похибка перетворення не перевищує 0,01...0,03 %). Поряд з тензорезисторами в ПВП таких ваг убудовані електричні опори, призначені для налагодження мостової схеми в процесі виготовлення, що забезпечує взаємозамінність перетворювачів, а також у разі потреби об'єднувати в загальну схему кілька перетворювачів. Перевантаження до 150 % від номінального не викликає зсуву нуля перетворювача, а механічні ушкодження не виникають навіть у разі перевантаження до 500 % від номінального значення.

Наразі виробники пропонують дуже великий вибір різноманітних тензометричних перетворювачів. Вибираючи конкретну модель тензоперетворювача, слід враховувати цілу низку чинників, зокрема таких:

Можливі варіанти розміщення одного чи кількох ПВП у вагових або інших силовимірних пристроях залежно від їх конструкції та призначення. Якщо центр вимірюваного зусилля нижче від місця кріплення тензометричного ПВП, треба вибирати ПВП, що працюють на розтягання, а коли вище – ті, що працюють на стискання.

Максимальне питоме навантаження на ПВП і можливі перевантаження. Максимально можливе питоме навантаження ПВП має не перевищувати його верхньої границі вимірювання. При цьому слід враховувати не тільки величину вимірюваного зусилля, а й додатковий вплив інших зовнішних чинників. Наприклад, у разі використання тензометричних ПВП для вимірювання маси рідких продуктів, які зберігаються в резервуарах, окрім дії власне маси продукту та резервуара, слід враховувати також можливі додаткові навантаження від таких зовнішніх впливів, як динамічні навантаження, вітрові навантаження тощо (у випадку сипучих продуктів - також можливі односторонні зсуви). Як і дифманометри, тензометричні ПВП завжди треба вибирати з більшою верхньою границею вимірювання, ніж максимально можливе значення вимірюваного навантаження.

Точність системи та дискретність відліку. Слід пам’ятати, що похибка вимірювання визначається навантажувальною кривою тензометричного ПВП та жорсткістю системи (відношенням навантаження до деформації), а дискретність − лише можливостями АЦП вагового індикатора. Потрібно також враховувати особливості умов експлуатації тензометричного ПВП.

Вимірювальні мости та схеми підключення тензорезисторів. Для вимірювання різних фізичних величин за допомогою різноманітних ПВП, зокрема тензоперетворювачів, у вимірювальних схемах широко використовують мости.

Принципова схема одинарного моста Вінстона (рис. 2.12, *а*) складається із чотирьох резисторів з активними опорами R_1, R_2, R_3 та R_4, з’єднаних у замкнутий чотирикутник *acbd.* Резистори $R_1 - R_4$ називають *плечима* або *гілками* моста. Плечі можна позначати й відповідними буквами, наприклад плече *ac* (з резистором R_1). У чотирикутнику *acbd* можна виділити дві *діагоналі: ab* та *cd.* У діагональ *cd* моста ввімкнено вимірювальний прилад (тому її називають *вимірювальною* діагоналлю), що має активний опір $R_{\text{пр}}$. Діагональ живлення *ab* містить джерело живлення з ЕРС *E* та внутрішнім опором R_E.

Можна підібрати опори плечей моста такими, щоб потенціали точок *c* і *d* (їх, як і точки *a* та *b*, називають *вершинами* моста), між якими увімкнено вимірювальний прилад, були однакові. Тоді струму в колі приладу $I_{\text{пр}}$ не буде ($I_{\text{пр}} = 0$). Процес підбору таких опорів, які забезпечують $I_{\text{пр}} = 0$, називають *зрівноваженням* або *балансуванням* моста.

Умову рівноваги моста можна отримати на підставі законів Кірхгофа, записаних для струмів у плечах моста з урахуванням показаних на рис. 2.12 напрямів проходження струмів:

$$R_1 I_1 - R_3 I_3 = 0, R_2 I_2 - R_4 I_4 = 0$$

звідки

$$R_1 I_1 = R_3 I_3 \quad (2.29)$$

$$R_2 I_2 = R_4 I_4 \quad (2.30)$$

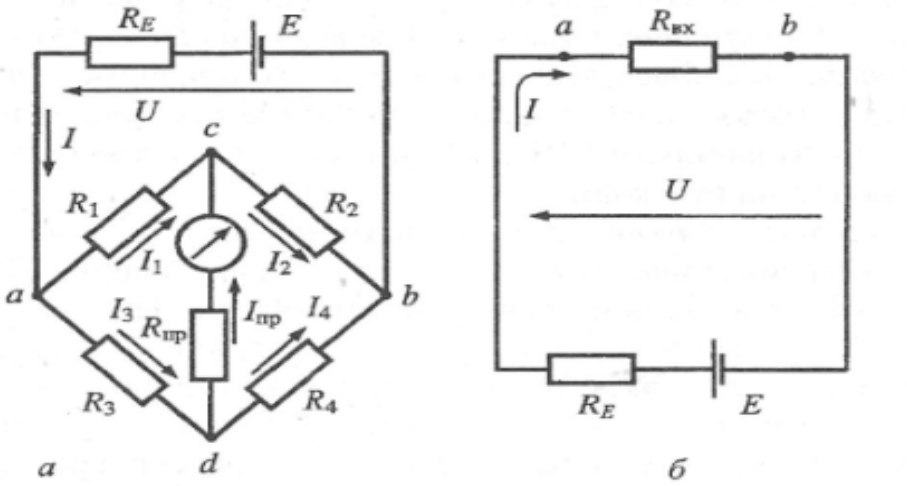


Рис. 2.12 Принципові схеми одинарного моста Вінстона:
а – вимірювальна; *б* – еквівалентна

Поділивши рівняння (2.29) на (2.30), отримаємо

$$R_1 I_1 / (R_2 I_2) = R_3 I_3 / (R_4 I_4) \quad (2.31)$$

Позаяк у зрівноваженому мості струм у колі вимірювального приладу $I_{пр} = 0$, то $I_1 = I_2$, $I_3 = I_4$ і рівність (2.31) набуде вигляду $R_1 / R_2 = R_3 / R_4$ або

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (2.32)$$

тобто *умову рівноваги моста* можна сформулювати так: міст буде зрівноваженим, якщо справджується рівність добутків опорів у протилежних плечах моста.

З виразу (2.32) видно, що за допомогою мостової схеми можна виміряти невідомий опір R_x резистора, підключивши його до одного із плечей моста, наприклад, до плеча *db* замість резистора R_4. Якщо відомо три опори R_1, R_2, R_3, невідомий опір $R_x = R_2 R_3 / R_1$. Зрівноважити міст можна або змінивши один опір (R_2), або змінивши відношення двох опорів (R_3 / R_1). Крім зрівноважених, існують незрівноважені мости, у яких $I_{пр} \neq 0$ і вимірюваний опір R_x визначається саме за відхиленням стрілки приладу у вимірювальній діагоналі моста (зазвичай це мілі- чи мікроамперметр), тобто за величиною $I_{пр}$, оскільки $I_{пр} = f(R_x)$.

На підставі законів Кірхгофа для струму в діагоналі вимірювання, що містить вимірювальний прилад, можна отримати вирази $I_{\text{пр}}$ через напругу живлення U:

$$I_{\text{пр}} = U(R_1R_4 - R_2R_3)/M \quad (2.33)$$

$$I_{\text{пр}} = I(R_1R_4 - R_2R_3)/N \quad (2.34)$$

де

$$M = (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)R_{\text{пр}} + R_1R_2(R_3 + R_4) + R_3R_4(R_1 + R_2)$$

$$N = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)R_{\text{пр}} + (R_1 + R_3)(R_2 + R_4)$$

До речі, з рівняння (2.33) або (2.34) можна вивести отриману умову рівноваги моста (2.32), прирівнявши $I_{\text{пр}}$ до нуля.

Складне з'єднання резисторів $R_1 - R_4$, $R_{\text{пр}}$ у мостовій схемі можна перетворити в еквівалентний опір $R_{\text{вх}}$ − вхідний опір моста в діагоналі живлення *ab*. Еквівалентну схему моста показано на рис. 2.12, *б*. Залежно від співвідношення опорів $R_{\text{вх}}$ і R_E розрізняють низькоомні та високоомні мостові вимірювальні схеми.

Якщо $R_{\text{вх}} \ll R_E$, то міст називають *низькоомним*. У таких мостах зміна опору плечей майже не впливає на струм живлення I, тобто можна вважати, що $I \approx \text{const}$. Для розрахунку низькоомних мостів зазвичай використовують рівняння (2.34).

Якщо $R_{\text{вх}} \gg R_E$, то міст називають *високоомним*. У цьому разі сталою величиною можна вважати напругу на затискачах моста $U = E - IR_E \approx \text{const}$. Для розрахунку високоомних мостів зазвичай використовують рівняння (2.33).

Розділивши рівняння (2.33) на (2.34), одержимо вираз для вхідного опору моста:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U}{I} = M/N$$

Детальніше про використання мостів у технологічних вимірюваннях ітиметься у наступних розділах, а тут розглянемо, як буде змінюватися чутливість мостової схеми залежно від варіанта підключення тензоперетворювачів у плечі моста.

Найчастіше використовують просту (рис. 2.13, *а*) схему рівноплечого ($R_2 = R_3 = R_4 = R_0$) моста з одним тензоперетворювачем $R_1 = R_0 \pm \Delta R$, де R_0−опір тензоперетворювача, що відповідає початковому значенню вимірюваної неелектричної величини, а знак «±» − протилежним напрямам деформації тензоперетворювачів (розтяганню та стисканню відповідно).

Скористаємося рівнянням (2.34) для визначення зміни струму, що проходить через вимірювальний прилад:

$$\Delta I_{\text{пр}} = I\frac{(R_1 \pm \Delta R)R_0 - R_0^2}{(R_0 \pm \Delta R + 3R_0)R_{\text{пр}} + (R_0 \pm \Delta R + R_0)2R_0}$$
$$= I\frac{R_0^2 \pm \Delta R R_0 - R_0^2}{4R_0R_{\text{пр}} \pm \Delta R R_{\text{пр}} + 4R_0^2 \pm 2\Delta R R_0}$$
$$= I\frac{\pm \Delta R R_0}{4R_0R_{\text{пр}} \pm \Delta R R_{\text{пр}} + 4R_0^2 \pm 2\Delta R R_0}$$

Для малих приростів ΔR у знаменнику можна знехтувати складовими $\Delta RR_{\text{пр}}$ і $2\Delta RR_0$ порівняно з іншими складовими. Тоді

$$\Delta I_{\text{пр}} = \pm \Delta RI/[4(R_{\text{пр}} + R_0)]$$

Чутливість мостової схеми визначають як відношення приросту струму у вимірювальній діагоналі $\Delta I_{\text{пр}}$ до зміни приросту опору одного з плечей моста (наприклад, R_1 на рис. 2.12), що зумовила цей приріст: $S_{\text{сх}} = \Delta I_{\text{пр}}/\Delta R_1$. Оскільки розглядуваний міст рівноплечий і $\Delta R_i = \Delta R$, то

$$S_{сх} = \frac{\Delta I_{\text{пр}}}{\Delta R} = I/[4(R_{\text{пр}} + R_0)] = S_0$$

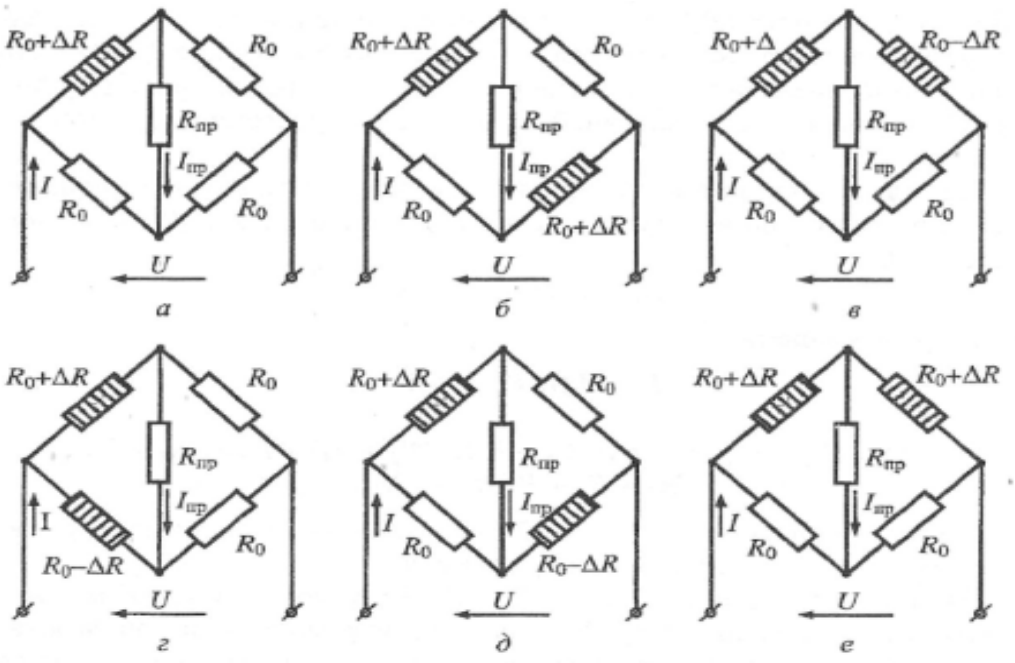


Рис. 2.13. Варіанти ввімкнення тензоперетворювачів у мостову схему

Беручи чутливість моста з одним тензоперетворювачем за вихідну S_0, виразимо через неї чутливість решти варіантів підключення тензоперетворювачів до мостів, показаних на рис. 2.13.

Два ідентичні тензоперетворювачі з однаково змінюваним опором $R_0 + \Delta R$, увімкнені в протилежні плечі моста, показано на схемі рис. 2.13, *б*. Приріст струму у вимірювальному приладі $\Delta I_{\text{пр}} = \pm \Delta RI/[2(R_{\text{пр}} + R_0)]$, тобто чутливість такої схеми ,$S_{\text{сх}} = 2S_0$ збільшилась удвоє.

Таке ж збільшення чутливості властиве й для схеми, показаної на рис. 2.13, *в,* де другий тензоперетворювач увімкнено не в протилежне плече, а в сусіднє, і його опір не збільшується, а зменшується: $R_0 - \Delta R$. У схемах, показаних на рис. 2.13, *а, б, в,* чутливість не є сталою, тобто залежність

$\Delta I_{пр} = f(\Delta R)$ нелінійна.

Якщо тензоперетворювачі з протилежно змінюваними опорами увімкнути в сусідні плечі моста за схемою рис. 2.13, *г* ($R_0 + \Delta R$ − у плече R_1 а $R_0 - R$ − у плече R_3), то його чутливість, як і раніше, буде вдвічі більшою ($S_{сх} = 2S_0$), а залежність $\Delta I_{пр} = f(\Delta R)$ залишатиметься лінійною в доволі широких межах. Ця схема має деяку особливість, яку слід вважати її вадою: якщо тензоперетворювачі являтимуть собою опори з рухомим контактом, то живлення до схеми буде підводитися саме через цей рухомий контакт, що зменшує надійність схеми.

Якщо тензоперетворювачі підключено за схемами, наведеними на рис. 2.13, *д, е,* зміна опору одночасно в обох плечах не спричинює зміни струму у вимірювальному приладі, тобто $S_{сх} = 0$. Таке увімкнення тензоперетворювачів слід вважати помилковим.

Якщо ввімкнути чотири однакові тензоперетворювачі в усі чотири плечі (з чергуванням ПВП зі зростанням $R_0 + \Delta R$ і зменшенням $R_0 - \Delta R$ їх опорів, як це досягається поєднанням схем, показаних на рис. 2.13, *б, в, г),* то приріст струму у вимірювальному приладі становитиме

$\Delta I_{пр} = \pm \Delta R I / (R_{пр} + R_0)$. При цьому буде забезпечено максимальну чутливість $S_{сх} = 4S_0$.

2.2.3. Терморезистивні перетворювачі

До терморезистивних перетворювачів належать:

- металеві терморезистори (терморезистивні перетворювачі);
- напівпровідникові терморезистори (термістори і позистори).

Принцип дії терморезистивних перетворювачів (на практиці поширена назва ***термометри опору*** (ТО)) ґрунтується на властивості провідників чи напівпровідників змінювати електричний опір у разі змінення температури. Цю залежність характеризує температурний коефіцієнт опору (ТКО).

Для терморезистивних перетворювачів використовують матеріали, що володіють високою стабільністю ТКО, високою відтворюваністю електричного опору при даній температурі, значним питомим електричним опором, високим ТКО, стабільністю хімічних і фізичних властивостей при нагріванні, інертністю до впливу досліджуваного середовища. До таких матеріалів в першу чергу відносяться платина, мідь, нікель, вольфрам та ін . Найбільш широко застосовують платинові і мідні терморезистори.

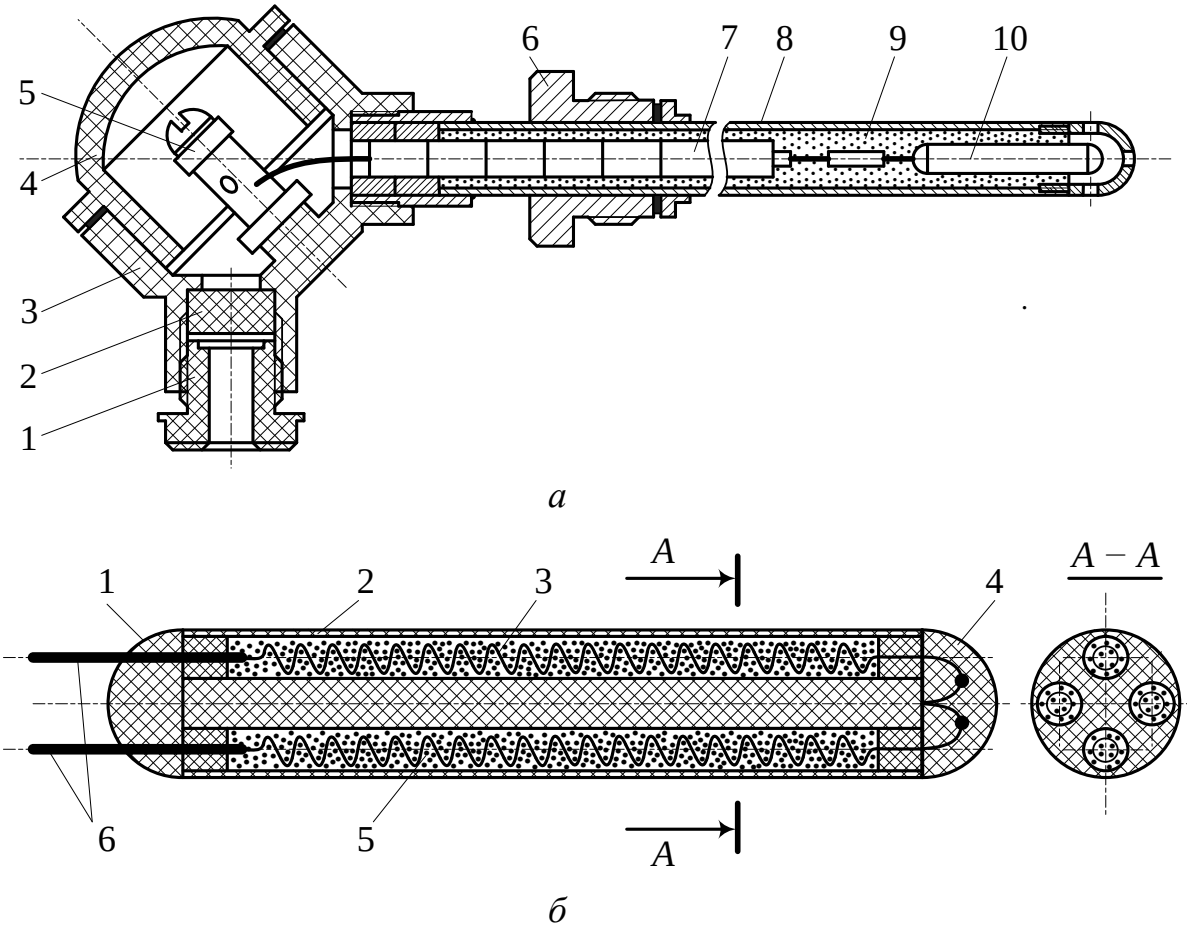
Чутливий елемент (ЧЕ) ТО може бути виконано з металів і напівпровідників. Вітчизняна промисловість випускає стандартні металеві термометри опору, чутливий елемент яких може бути виготовлено з міді, платини, нікелю, вольфраму, молібдену, танталу і ніобію. У технічній документації прийнято скорочене позначення термометрів опору по перших літерах: термометр

опору мідний (ТОМ), термометр опору платиновий (ТОП), термометр опору нікелевий (ТОН).

Провідникові (металеві) ТО. Конструкцію металевого термометра опору наведено на рис. 2.14, *а*. Термометр має чутливий елемент 10, поміщений в захисний корпус 8. Чутливий елемент за допомогою вивідних провідників 6 (рис. 2.14, *б*), які проходять через фарфорові ізолятори (намистини) 7, з'єднано із затисками контактної клеми 5.

Вільний простір трубки заповнений порошком окисиду алюмінію 8, який покращує теплообмін між чутливим елементом і стінками трубки. Контактні клеми 5 закріплені в корпусі головки терморезистивного перетворювача опору, що містить штуцер для кабелю зовнішніх з'єднань 1 з втулкою ущільнювача і затискною гайкою. Корпус 3 головки закритий кришкою 4, ущільненою прокладкою. На об'єкті термометр вмонтовують при допомозі штуцера з гайкою 6.

Матеріал ЧЕ ТО має бути дуже чутливим до змінювання температури. Він характеризується ТКО, який показує величину приросту опору у разі змінювання температури ТО на один градус.



а

б

Рис. 2.14. Провідниковий термометр опору:

а − конструкція термометра опору: 1 − штуцер під кабель; 2 − прокладка; 3 − корпус головки; 4 − кришка; 5 − контактна клема; 6 − гайка для кріплення; 7 − ізолятори; 8 − корпус; 9 − окисел алюмінію; 10 − чутливий елемент; *б* − чутливий елемент: 1, 4 − глазуреві заглушки; 2 − керамічна трубка; 3 − спіраль; 5 − оксид алюмінію; 6 − виводи

Робочий струм у ЧЕ не перевищує 10...15 мА. Тепло, яке при цьому виділяється, дуже мале й майже не впливає на точність вимірювання. Термоперетворювачі опору дозволяють надійно вимірювати температуру в межах мінус 260...+1100 °С. Біфілярна (подвійно-зустрічна) намотка провідника дозволяє компенсувати індуктивну складову опору.

Платинові ТО. Із провідникових матеріалів широко застосовують *платину*. Цей благородний метал навіть за високих температур в окисному середовищі не змінює своїх фізичних і хімічних властивостей. Температурний коефіцієнт опору в діапазоні 0...100 °С становить приблизно 1/273 K^{-1}, питомий опір за температури 20 °C − $0{,}105 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, діапазон перетворюваних температур від −200 до +1100 °С.

Вихідний опір (при 0 °С) платинових стандартних терморезисторів рівний 1, 5, 10, 46, 50, 100 і 500 Ом. Допустиме значення струму, що протікає по терморезистору при включенні його у вимірювальний ланцюг, має бути таким, щоб зміна опору терморезистора при нагріві не перевищувала 0,1 % вихідного опору. Залежність електричного опору від температури – лінійна (див. п. 1.5 дод. 1).

Коефіцієнт перетворення платинових термоперетворювачів опору визначається інтерполяційними співвідношеннями (див. п. 1.6 дод. 1).

Чутливий елемент сучасного платинового терморезистора являє собою спіраль 3 із платинової проволоки марки Пл-3 діаметром 0,05 мм, поміщеної в канавки двох або чотириканального керамічного каркаса *2* і ущільненої порошкоподібним оксидом алюмінію *5* (рис. 2.13, *б*). Оксид алюмінію є хорошим електричним ізолятором, володіє інгибіторними (що уповільнюють хімічні реакції) властивостями, великою теплостійкістю і хорошою теплопровідністю.

Вади платинових перетворювачів опору: висока вартість платини, досить висока забруднюваність її за високих температур парами металів (особливо заліза), порівняно невисока хімічна стійкість у відновному середовищі, унаслідок чого вона стає крихкою і втрачає стабільність характеристик, а також нелінійність функції $R_\Theta = f(\Theta)$.

МіднітО. Мідь завдяки низькій вартості і досить високій стійкості до корозії, широко застосовують у перетворювачах температури в діапазоні −200...+200 °С. Температурний коефіцієнт опору міді α = 1/234,7 K^{-1}, залежність електричного опору від температури – лінійна (див. п. 1.5 дод. 1).

Коефіцієнт перетворення мідних термоперетворювачів опору визначається інтерполяційними співвідношеннями (див. п. 1.6 дод. 1).

У мідних термометрах вимірювальний перетворювач є безкаркасною безіндукційною (біфілярне намотування) обмоткою з мідного дроту, покритою плівкою фторопласта. До обмоток припаюють виводи з дроту більшого перетину. Перетворювачі поміщають в тонкостінну металеву гільзу.

Головною вадою мідних ТО вважають високу окиснюваність під час вимірювання, через що їх застосовують у порівняно вузькому діапазоні температур у середовищах з низькою вологістю та безагресивних газів.

Крім платини та міді, для ЧЕ ТО використовують *нікель* − хімічно стій

кий матеріал навіть за високих температур, проте має складну залежність опору від температури і невисоку її відтворюваність.

Залежність електричного опору від температури визначається інтерполяційними співвідношеннями (див. п. 1.5 дод. 1). Коефіцієнт перетворення нікелевих термоперетворювачів опору визначається інтерполяційними співвідношеннями (див. п. 1.6 дод. 1).

Номінальні статичні характеристики (НСХ) перетворення ТО визначають за рівнянням

$$R_\Theta = R_0 W_\Theta, \qquad (2.35)$$

де R_Θ, R_0 − опори ТО для температур Θ і 0 °С, Ом; W_Θ − відношення опорів для температури Θ до опору для 0 °С. Значення W_Θ для різних ТО у певних діапазонах температури визначають з відповідних інтерполяційних рівнянь, наведених у ДСТУ 2858-94 (дод. 1).

Тугоплавкі метали – вольфрам, молібден, тантал і ніобій – застосовують обмежено. Вплив рекристалізації та росту зерен в результаті дії температури робить термочутливий елемент з цих матеріалів крихким і тому дуже чутливим до механічних вібрацій.

Сплави з вищим питомим електричним опором порівняно з чистими металами як матеріали ЧЕ ТО не застосовують через порівняно низький ТКО, значення якого значною мірою залежить від кількісного та якісного складу домішок. Потрібно також відзначити, що незначна кількість домішок у чистих металах майже не змінює характеру залежності їх опору від температури.

Термоперетворювачі опору з плівковими ЧЕ з металевої фольги, розміщеної на ізолювальній підкладці, не так поширені, як провідникові, хоча сфера їх застосування постійно розширюється, оскільки вони мають малі габарити, кращі динамічні властивості, вищу чутливість і відповідно невисоку вартість.

Напівпровідникові терморезистори.

Напівпровідниковим резистором називають напівпровідниковий перетворювач з двома виводами, в якому використовується залежність електричного опору напівпровідника від напруги, температури, освітленості і інших факторів.

У напівпровідникових резисторах застосовується напівпровідник, рівномірно легований домішками. Залежно від типу домішок і конструкції резистора вдається отримати різні типи напівпровідникових резисторів. Класифікацію і умовні графічні позначення напівпровідникових резисторів наведено на рис. 2.15.

Лінійний резистор − напівпровідниковий резистор, в якому застосовується слаболегований матеріал типу кремнію або арсеніду галію. Питомий електричний опір такого напівпровідника мало залежить від напруженості електричного поля і щільності електричного струму. Напівпровідникові лінійні резистори широко застосовують в інтегральних мікросхемах.

Варістор − напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги, тому його вольтамперная характеристика нелінійна. Напів-

провідниковим матеріалом для виготовлення варисторов служить карбід кремнію.

Тензорезістор − напівпровідниковий резистор, в якому використовується залежність електричного опору від механічних деформацій. Для виготовлення тензорезисторів найчастіше застосовують кремній, як з електропровідністю *p*-типу, так і *n*-типу.

Фоторезистор − напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від освітленості. Переваги фоторезисторів: висока чутливість, можливість використання в інфрачервоній області спектру випромінювання, невеликі габарити і застосовність для роботи в ланцюгах постійного і змінного струмів.

Терморезистор − напівпровідниковий пристрій, принцип дії якого засновано на терморезисторному ефекті. Він полягає в зміні опору напівпровідника у сторону збільшення чи зменшення за рахунок убування або зростання його температури. Проте сам механізм зміни опору із зміною температури відмінний від подібного явища в металах (про що і говорить факт зменшення опору при збільшенні температури).

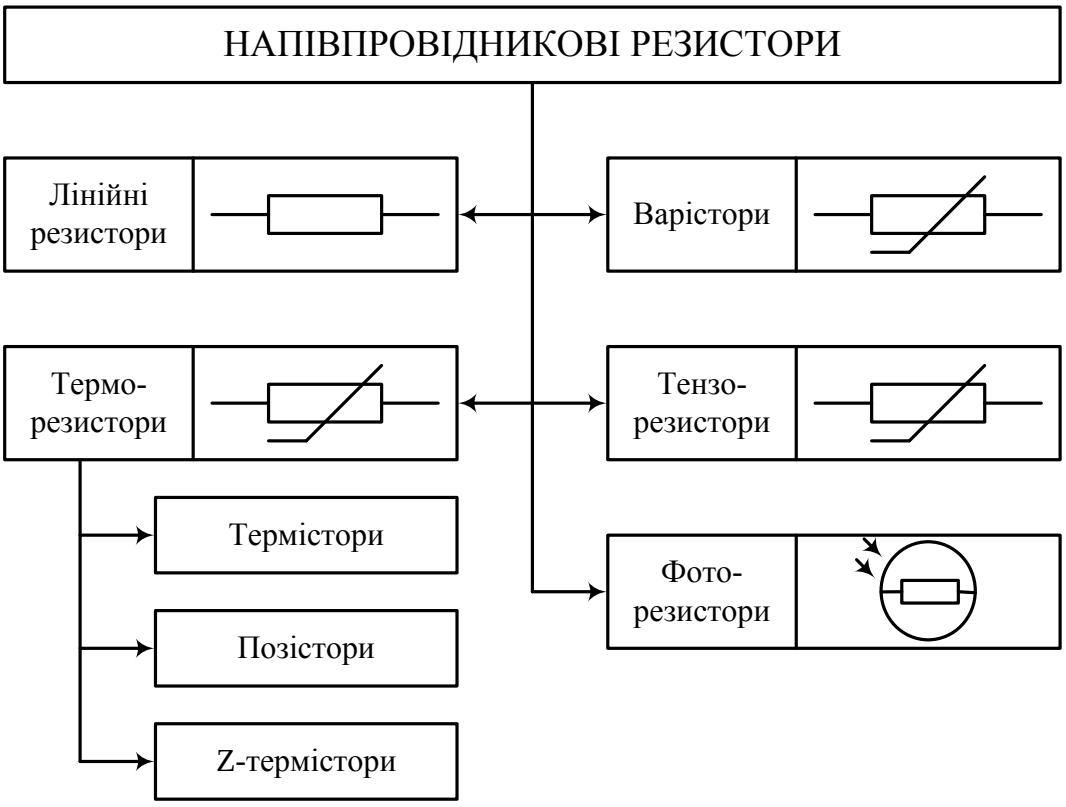


Рис. 2.15 Класифікація і умовні графічні позначення напівпровідникових резисторів

Терморезистор був винайдений Самюелем Рубеном (Samuel Ruben) в 1930 році.

Терморезистори − це температурні датчики, які перетворюють значення температури в опір. Будь-який провідник має опір, який при зміні тем-

ператури також змінюється. Величина, яка показує наскільки змінюється опір при зміні температури на 1 °С, називається температурним коефіцієнтом опору − ТКО.

Якщо при збільшенні температури опір збільшується, то ТКО додатний, а якщо зменшується, то негативний. Розрізняють два типи терморезисторів: термістори і позистори.

Термістори − напівпровідникові термометри опору з від'ємним ТКО. У терміcторів при збільшенні температури опір зменшується. Їх ще називають NTC-термістори (Negative temperature coefficient).

Позистори − напівпровідникові термометри опору з додатним температурним коефіцієнтом опору. У позисторов із зростанням температури росте і опір. Їх ще називають PTC-термістори (Positive temperature coefficient).

Основні параметри терморезисторів з від'ємним ТКО :

1. Габаритні розміри.

2. Величина опору зразків R_Θ (у Ом) при певній температурі навколишнього середовища у Θ °С. Для терморезисторів, розрахованих на робочі температури приблизно від −100 до 125…200 °С, температура навколишнього середовища приймається рівною 20 або 25 °С. Електричний опір термістора R_Θ при навколишній температурі +20 °С називають номінальним або холодним опором.

3. Величина ТКО α у відсотках на 1 °С. Зазвичай вона ввказується для тієї ж температури Θ, що і холодний опір, і в цьому випадку позначається через α_Θ.

$$\alpha = \frac{1}{R_\Theta}\frac{dR_I}{d\Theta}\cdot 100\% = -\frac{B}{\Theta^2}. \qquad (2.36)$$

4. Постійна часу T, що характеризує теплову інерційність терморезистора, і визначається як час в секундах, за який температура терморезистора змінюється на 63 % при перенесенні його з повітряного середовища з температурою 0 °С в повітряне середовище з температурою 100 °С.

Теплова інерційність термістора, що характеризується його постійною часу, визначається конструкцією і розмірами і залежить від теплопровідності середовища, в якому знаходиться термістор.

Для різних типів терміcторів постійна часу лежить в межах від 0,5 до 140 с.

5. Максимально допустима температура Θ_{max}, до якої характеристики терморезистора довгий час залишаються стабільними.

6. Максимально допустима потужність розсіювання P_{max} у Вт, що не викликає незворотних змін характеристик терморезистора. Природно, при навантаженні терморезистора потужністю P_{max} його температура не повинна перевищувати Θ_{max}.

7. Коефіцієнт розсіяння H у Вт на 1 °С. Чисельно дорівнює потужності, що розсіюється на терморезисторі при різниці температур зразка і навколишнього середовища в 1 °С.

8. Коефіцієнт температурної чутливості B, розмірність − K.

$$B = \frac{\Theta_1 \cdot \Theta_2}{\Theta_2 - \Theta_1} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2}. \qquad (2.37)$$

9. Теплоємність С у Дж на 1 °С, рівна кількості тепла (енергії), необхідній для підвищення температури терморезистора на 1 °С. Можна довести, що T, H і С зв'язані між собою наступним співвідношенням:

$$T = \frac{C}{H}. \qquad (2.38)$$

10. Коефіцієнт енергетичної чутливості G у Вт/%R, чисельно дорівнює потужності, яку потрібно розсіяти на терморезисторі для зменшення його опору на 1 %. Коефіцієнти розсіяння і енергетичної чутливості залежать від параметрів напівпровідникового матеріалу і від характеру теплообміну між зразком і навколишнім середовищем. Величини G, H і α зв'язані співвідношенням:

$$G = \frac{H}{100\alpha}. \qquad (2.39)$$

Дійсно

$$G = \frac{\Delta P \cdot R}{\Delta R \cdot 100} = \frac{\frac{\Delta P}{\Delta \Theta}}{\frac{100 \cdot \Delta R}{\Delta R \cdot R}} = \frac{H}{100\alpha}. \qquad (2.40)$$

Для позисторів, окрім ряду приведених вище параметрів, зазвичай вказують також ще приблизне положення інтервалу додатного температурного коефіцієнта опору, а також кратність зміни опору в області позитивного ТКО

На рис. 2.16 зображено статичну характеристику позистора з характерними ділянками:

ділянка з інтервалом температур менше Θ_{min}, де ТКО $\alpha < 0$;

ділянка з інтервалом температур Θ_{min} Θ_{max}, де ТКО $\alpha > 0$;

ділянка з інтервалом температур більше Θ_{max}, де ТКО $\alpha < 0$.

Температурна залежність опору є головною характеристикою терморезисторів, що в значній мірі визначає решту характеристик цих виробів. Природно, вона аналогічна температурній залежності питомого опору напівпровідника, з якого виготовлений даний терморезистор.

Дослідження показують, що температурна залежність опору більшості типів терморезисторів з від'ємним ТКО з достатньою для практики точністю у всьому робочому інтервалі температур або в його частині апроксимується виразом

$$R_T = Ae^{B/\Theta}, \qquad (2.41)$$

де R_Θ – величина опору терморезистора при температурі Θ, K; постійна $A = \beta l/S$ залежить від фізичних властивостей матеріалу і габаритів терморезистора (l − відстань між електронами в см і S − площа поперечного перерізу напівпровідникового елементу терморезистора у см^2); постійна B залежить від фізичних властивостей матеріалу і може мати одне або два значення в інтервалі робочих температур.

Прологарифмувавши вираз (2.41), отримаємо:

$$lnR_T = \frac{B}{\Theta} + lnA. \qquad (2.42)$$

Вираз (2.42) в координатах lnR_T і $1/\Theta$ являє собою рівняння прямої, що значно полегшує визначення інтервалу температур, в якому формула з необхідною точністю апроксимує дійсну залежність $R_\Theta(\Theta)$. За результатами вимірювань R_Θ і Θ будують графік залежності $lnR_\Theta = f(1/\Theta)$. Якщо через точки, отримані експериментально, можна провести пряму, то вважають, що в даному інтервалі температур вираз для R_Θ є справедлим.

Для практичних розрахунків зручно виключити постійну A. Написавши формулу для R_Θ для двох температур Θ_2 і Θ_1 і розділивши одне на інше, отримаємо:

$$R_{\Theta_2} = R_{\Theta_1} e^{B\cdot\frac{\Theta_1-\Theta_2}{\Theta_1\cdot\Theta_2}}. \qquad (2.43)$$

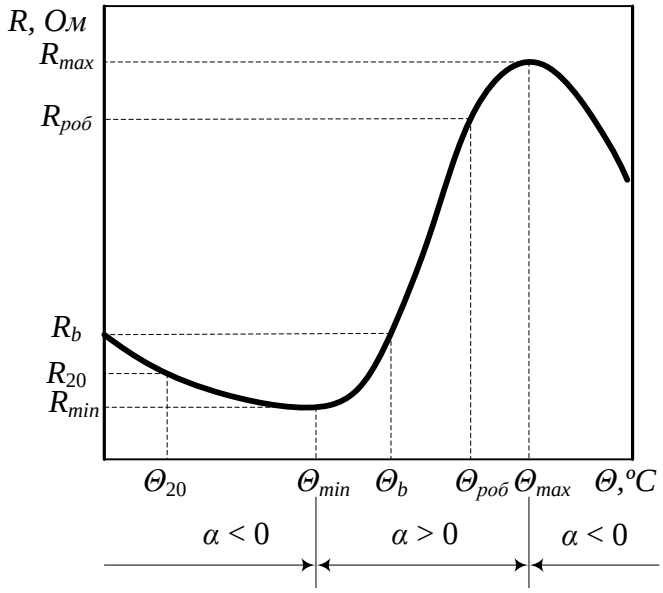


Рис. 2.16 Статична характеристика позистора

За формулою (2.43) можна розрахувати величину опору терморезистора при будь-якій температурі Θ_2 (у інтервалі робочих температур), знаючи значення постійною B і опір терморезистора при якійсь температурі Θ_1.

Величина B визначається експериментально вимірюванням опору терморезистора при двох температурах Θ_1 і Θ_2. Логарифмуючи попередній вираз (2.43), отримаємо:

$$B = \frac{\Delta \ln R_\Theta}{\Delta(1/\Theta)}, \qquad (2.44)$$

де $\Delta lnR_\Theta = lnR_2 - lnR_1$, а $\Delta(1/\Theta) = \frac{1}{\Theta_2} - \frac{1}{\Theta_1}$.

Розмірність B − градуси Цельсія або Кельвіна. B − це коефіцієнт температурної чутливості. Якщо визначити ТКО терморезистора α як це зазвичай прийнято:

$$\alpha = \frac{1}{R_T}\frac{dR_I}{dT}, \tag{2.45}$$

то з виразу (2.45) витікає, що значення температурного коефіцієнта опору в діапазоні температур від 20…150 °С можна знайти за допомогою виразу:

$$\alpha = -\frac{B}{\Theta^2}, \tag{2.46}$$

Для позисторів температурні залежності опору, зняті в широких інтервалах температур, мають складний характер. При достатньо низьких і високих температурах опір зменшується при збільшенні температури згідно із законом, близькому до експоненціального. У проміжній області опір R_Θ різко зростає при підвищенні температури. Крутизною графіка, а, отже, і величиною ТКО, можна керувати в широких межах різними технологічними прийомами.

Для багатьох типів позисторів опір в досить великому інтервалі температур (близько декількох десятків градусів Цельсія/Кельвіна) міняється строго по експоненціальному закону:

$$R_T = A \cdot e^{\alpha \cdot \Theta}, \tag{2.47}$$

де A – постійна; α – температурний коефіцієнт опору при температурі Θ °С в абсолютних одиницях.

Основними статичними характеристиками напівпровідникових терморезисторів є:

температурна характеристика терморезистора – це залежність опору від температури (рис. 2.17, *а*);

вольт-амперна характеристика (ВАХ) – це залежність напруги на терморезисторі від струму, що проходить через нього (рис. 2.17, *б*). Знімається в умовах теплової рівноваги з навколишнім середовищем; залежність напруги на терморезисторі від струму, що проходить через нього;

підігрівна характеристика – характеристика, властива терморезисторам непрямого підігріву, – залежність опору резистора від потужності, що підводиться (рис. 2.17, *в*).

Сучасні терморезистори з від'ємним ТКО зазвичай виготовляють із слідуючих оксидних систем: нікель-марганець-мідь, нікель-марганець-кобальт-мідь, кобальт-марганець-мідь, залізо-титан, нікель-літій, кобальт-літій, мідь-марганець. Крім того, практикується додавання таких елементів, як залізо, алюміній, цинк, магній, які дозволяють модифікувати властивості перерахованих систем.

В схемах автоматики найбільше розповсюдження отримали мідно-марганцеві термістори (типа ММТ) і кобальто-марганцеві термістори (типа КМТ). На рис. 2.17 наведено статичні характеристики цих термісторів.

Температурний коефіцієнт опору термісторів приблизно у 6...10 разів більш, ніж у металевіх терморезісторів. Чутливість напівпровідникових тер-

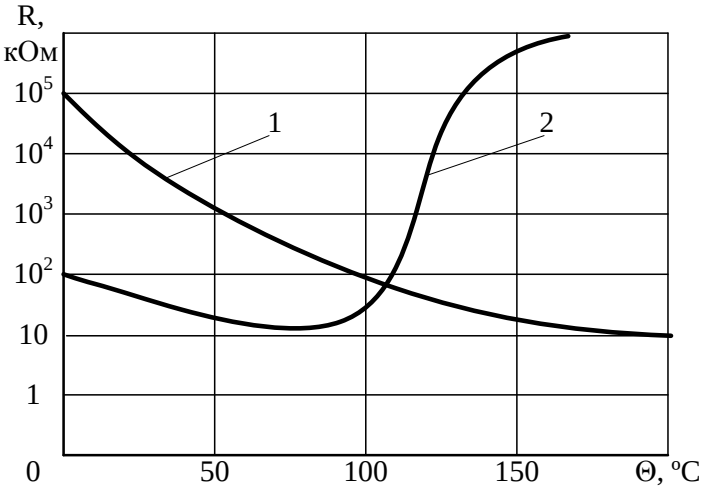
морезисторів значно вища, ніж металевих, оскільки температурний коефіцієнт опору напівпровідникових терморезисторів приблизно на порядок більше, чим у металевих. Якщо для металів $\alpha = (4\ldots6)\cdot10^{-3}$ 1/°С, то для напівпровідникових терморезисторів $|\alpha| > 4\cdot10^{-2}$ 1/°С. Правда, для термісторів цей коефіцієнт непостійний, він залежить від температури і їм рідко користуються при практичних розрахунках.

У табл. 2.1 зведено основні характеристики деяких термісторів.

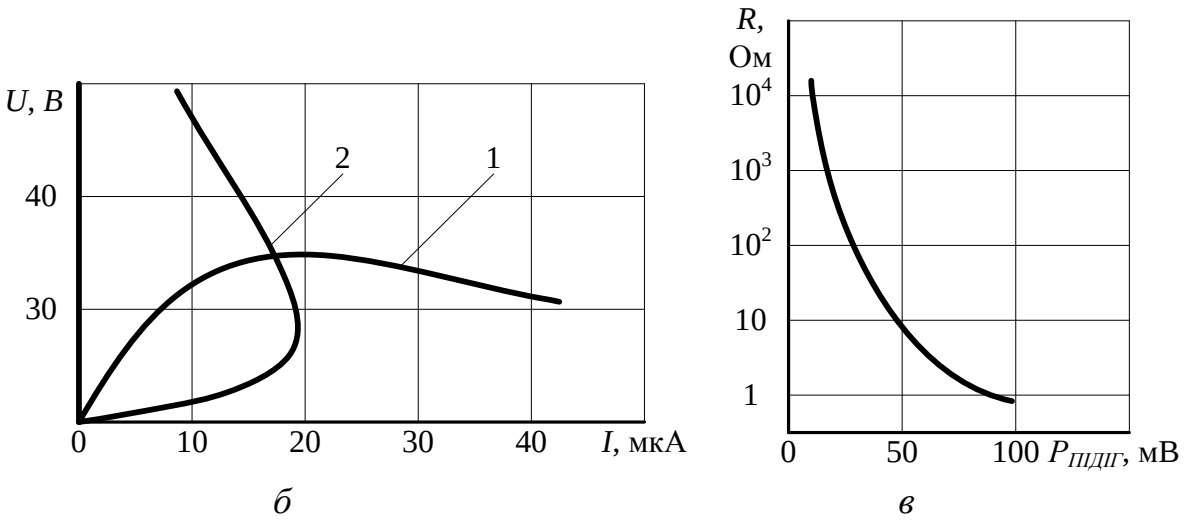
Терморезистори з позитивним ТКО (позистори) можна розділити на дві групи:

1. Терморезистори з напівпровідникового матеріалу (зазвичай Si (кремнію)) у формі невеликих пластин з двома виводами на протилежних сторонах. Їх застосування засноване на тому, що леговані кристали Si як *n*-, так і *p*-типу мають позитивні ТКО при температурі від криогенних до 150 °С і вище, причому ТКО при кімнатній температурі приблизно рівний 0,8 % на 1 °С.

2. Терморезистори з великим ТКО (до 70 % на 1 °С), але в більш обмеженому діапазоні температур. Матеріалом в даному випадку є полікристалічний напівпровідниковий титанат барію з великою зміною ТКО при температурі 120 °С, відповідній сегнетоелектричної точці Кюрі цього матеріалу. Додаючи інші матеріали, наприклад титанат свинцю або стронцій, таку зміну ТКО можна отримати при температурах від −100 до +250 °С. Можна також змінити нахил кривої опору так, що велика зміна температур відбуватиметься у вужчому інтервалі температур, наприклад 0…100 °С.



а



б *в*

Рис. 2.17. Статичні характеристики напівпровідникових терморезисторів:

а − температурні; *б* − вольт-амперні; *в* − підігрівна; 1 − термістора; 2 − позистора

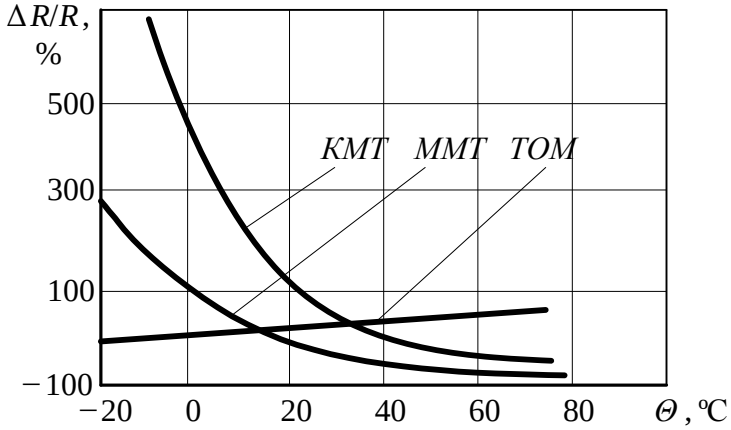


Рис. 2.18 Статичні характеристики термісторів

Таблиця 2.1.

Основні характеристики деяких термісторів

Тип термістора	Діапазон застосування, °С	ТКО, %/°С	Опір термістора, Ом
ММТ-8 (суміш окислу міді і марганцю)	−40…+80	−2,4… −3,4	1…100
КМТ-4 (суміш оксидів калія і марганцю)	−70…+120	−4,2…−8,4	20…2000
СТ3-19 (суміш двоокису титану з оксидами магнію, кобальту, ванадію)	−90…+125	−3,4…−4,5	$(2…15)\cdot10^3$

Примітки. В табл. 2. 1 подано значення опору термісторів при температурі 20 °С.

Терморезистори з додатним ТКО випускають на основі титанато-барієвої кераміки, опір цих елементів значно понижений додаванням рідкоземельних елементів. Титанат барію $BaTiO_3$ – діелектрик, тому його

питомий опір при кімнатній температурі великий $10^{10}…10^{12}$ Ом·см. При введенні туди домішок, таких, як лантан або церій, в нікчемно малих кількостях (0,1…0,3 атомного відсотка) його питомий опір зменшується до 10…100 Ом·см. Якщо ввести ці домішки в титанат барію, його опір у вузькому інтервалі температур збільшиться на декілька порядків.

В експлуатації широко використовуються такі марки позисторів:

СТ5-1, СТ6-1А, СТ6-1Б, СТ6-2Б та ін. На рис. 2.80 наведено статичні характеристики деяких позисторів.

Додатний температурний коефіцієнт опору позисторів у 3...4 рази вищий, ніж у термісторів, а постійна часу їх у 5…6 разів менша. Опір позисторів в області додатних температур різко зростає зі збільшенням температури до граничного її значення, а потім різко зменшується (див. рис. 2.19). В області від'ємних температур опір позисторів зі збільшенням температури зменшується.

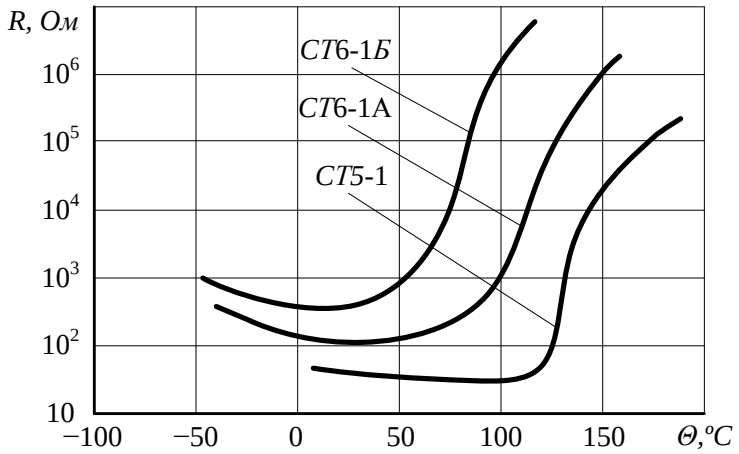


Рис. 2.19. Статичні характеристики позисторів

Розрізняють терморезистори низькотемпературні (розраховані на роботу при температурах нижче 170 *K*), середнетемпературні (170…510 *K*) і високотемпературні (вище 570 *K*). Крім того, існують терморезистори, призначені для роботи при 4,2 *K* і нижче і при 900…1300 *K*. Найширше використовуються середнетемпературні терморезистори з ТКО від −2,4 до −8,4 %/*K* і номінальним опором $1…10^6$ Ом.

Режим роботи терморезисторів залежить від того, на якій ділянці статичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) вибрана робоча точка. Своєю чергою ВАХ залежить як від конструкції, розмірів і основних параметрів терморезистора, так і від температури, теплопровідності навколишнього середовища, теплового зв'язку між терморезистором і середовищем.

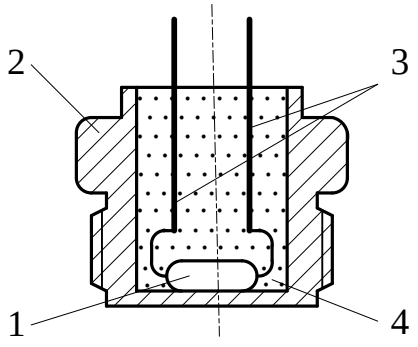
Терморезистори з робочою точкою на початковій (лінійній) ділянці ВАХ використовуються для вимірювання і контролю температури і компенсації температурних змін параметрів електричних кіл і електронних приладів. Терморезистори з робочою точкою на спадаючій ділянці ВАХ (з негативним опором) застосовуються як пускові реле, реле часу, вимірники потужності

електромагнітного випромінювання на СВЧ, стабілізаторів температури і напруги.

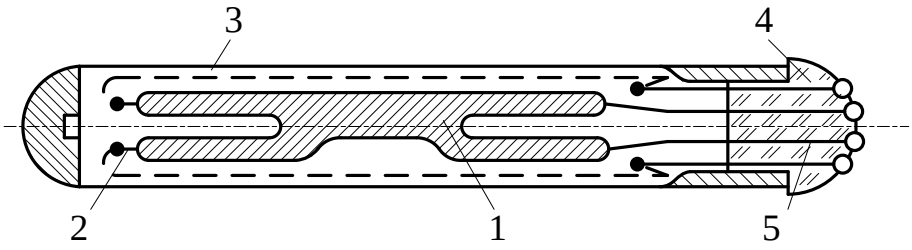
Режим роботи терморезистора, при якому робоча точка перебуває також на спадаючій ділянці ВАХ (при цьому використовується залежність опору терморезистора від температури і теплопровідності навколишнього середовища), характерний для терморезисторів, вживаних в системах теплового контролю і пожежної сигналізації, регулювання рівня рідких і сипких середовищ; дія таких терморезисторів заснована на виникненні релейного ефекту в ланцюзі з терморезистором при зміні температури навколишнього середовища або умов теплообмін терморезистора з середовищем.

Виготовляються також терморезистори спеціальної конструкції − з непрямим підігріванням. У таких терморезисторах є підігрівна обмотка, ізольована від напівпровідникового резистивного елементу (якщо при цьому потужність, що виділяється в резистивному елементі, мала, то тепловий режим терморезистора визначається температурою підігрівача, тобто струмом в нім). Таким чином, з'являється можливість змінювати стан терморезистора, не змінюючи струм через нього. Такий терморезистор використовується як змінний резистор, керований електрично на відстані.

На рис. 2.20 зображено приклади напівпровідникових термометрів опору. Конструкцію прецизійного германієвого термометру опору подано на рис. 2.20, *б*. Його чутливий елемент 1 виконано з монокристалічного германію, легованого сурмою. Він є тонкою вузькою пластиною з роздвоєними кінцями, до якої припаяно чотирьох золотих провідників 2 з платиновими виводами 5. Чутливий елемент поміщено в герметичну металеву гільзу 3, що закінчується скляною голівкою 4 з вваренними в неї платиновими виводами. Внутрішня стінка захисної гільзи покрита електроізоляційною плівкою. Гільза герметична і заповнена газоподібним гелієм під невеликим тиском. Такі германієві термометри опору можуть застосовуватися для вимірювання температур від 1,5 до 30 *K*.



а



б

Рис. 2.20. Напівпровідниковий термометр опору:

а − конструкція термометра опору: 1 − чутливий елемент; 2 − корпус; 3 − виводи; 4 − епоксидна смола; *б* − конструкція прецизійного германієвого ТО: 1 − чутливий елемент; 2 − провідники; 3 − герметична гільза; 4 − скляна голівка; 5 − платинові виводи

Терморезистор виготовляють у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб, намистинок і тонких пластинок переважно методами порошкової металургії.

Їх розміри можуть варіюватися в межах від 1…10 мкм до 1…2 см.

***Z*-термістори** − новий клас напівпровідникових термочутливих елементів, принцип роботи яких ґрунтується на енергетичних процесах, що відбуваються на молекулярному рівні в кристалі і, як наслідок, що викликають зміну опору самого елементу.

На відміну від найбільш поширених нині *NTC*-термісторів *Z*-термістори не потребують додаткових електронних схем, оскільки реалізують функцію зміни опору елементу на молекулярному рівні, маючи на виході керуючий сигнал достатньої потужності для подальшої його обробки. Безперечною перевагою використання *Z*-термісторів в системах контролю і вимірювання температури є гнучкість цих систем з можливістю внесення коректувань у вимірювальний блок (зміна довжини проводів, що підводять, зміна кількості *Z*-термісторів) без зміни блоку керування (*Z*-термістори не потребують схем балансування).

Володіючи високою перешкодозахисною, *Z*-термістори можуть бути використані в блоках контролю і вимірювання температури в системах з великими наведеннями, де до теперішнього часу вирішення подібних завдань було пов'язане з необхідністю екранування не тільки керуючого блоку, але й самого термочутливого елементу. Точність вимірювання і контролю температури *Z*-термістором складає соті долі градуса.

Термістори типу МТ-54 володіють дуже малою тепловою інерцією, їх постійна часу близько 0,02 с, і вони використовуються в діапазоні температур від –70 до +250 °С. Малі розміри термістора дозволяють використовувати його, наприклад, для вимірювань температури напівпровідникових приладів і обмоток електродвигунів.

На основі терморезисторів діють системи дистанційного і централізованого вимірювання і регулювання температури, системи теплового контролю машин і механізмів, схеми температурної компенсації, схеми вимірювання потужності ВЧ. Терморезистори знаходять застосування в промисловій

електроніці і побутовій апаратурі: рефрижераторах, автомобілях, електронагрівальних приладах, телевізорах, системах центрального опалювання і ін. У телевізорах часто використовуються терморезистори з позитивним ТКО для розмагнічування кінескопа.

Найперші пристрої, де застосовувалися терморезистори − це давачі для вимірювання або регулювання температури.

Терморезистори широко використовуються в різних пристроях не лише

як давачі. Після відповідної модифікації їх можна застосовувати в електрон

них пристроях затримки з достатньо широким інтервалом часів затримки, як конденсатори або котушки індуктивності в низькочастотних генераторах, для захисту від викидів напруги в ємкісних, індуктивних або резистивних схемах, як обмежувачі струму, напруги, для вимірювання тиску газу або теплопровідності.

Звичайно ж, застосування терморезисторів як датчиків температури має не лише плюси, але й свої мінуси. Так, наприклад, це інерційність, обумовлена постійною часу *T*, погана стабільність в певних умовах і так далі

Перевагами напівпровідникових терморезисторів є їх малі розміри, а отже, мала теплова інерція і можливість вимірювати температуру в труднодоступних місцях. Крім того, високий опір 30…40 кОм дозволяє нехтувати опором провідників, що підводять, і перехідним контактним опором.

Недоліком напівпровідникових терморезисторів, що обмежує впровадження їх в промисловість, є слабка відтворюваність властивостей (що виключає їх взаємозамінюваність), порівняно невисока максимальна робоча температура і великий розкид температурного коефіцієнта.

2.2.4. Фоторезисторні вимірювальні перетворювачі

Фотоперетворювачі використовуються в автоматиці для перетворення в електричний сигнал різних неелектричних величин: механічних переміщень, швидкості, розмірів рухомих деталей, температури, освітленості, прозорості рідкого або газового середовища і т. д.

За принципом кодування інформації фотоперетворювачі можна розділити на дві групи: з *амплітудною модуляцією* світлового потоку і з *часовою* або *частотною* модуляцією. У перетворювачів з амплітудною модуляцією значення фотоструму пропорційне світловому потоку, залежному від керованої (контрольованої) неелектричної величини. У перетворювачів з часовою або частотною модуляцією фотострум змінюється дискретно за рахунок повного або часткового переривання світлового потоку від дії неелектричної величини. Інформація про керований (контрольований) параметр кодується у цих перетворювачах у вигляді числа, частоти або тривалості імпульсів фото струму.

Фотоперетворювач у загальному випадку складається з фотоелектричного чутливого елементу (фотоелемента), джерела світла і оптичної системи (рис. 2.21).

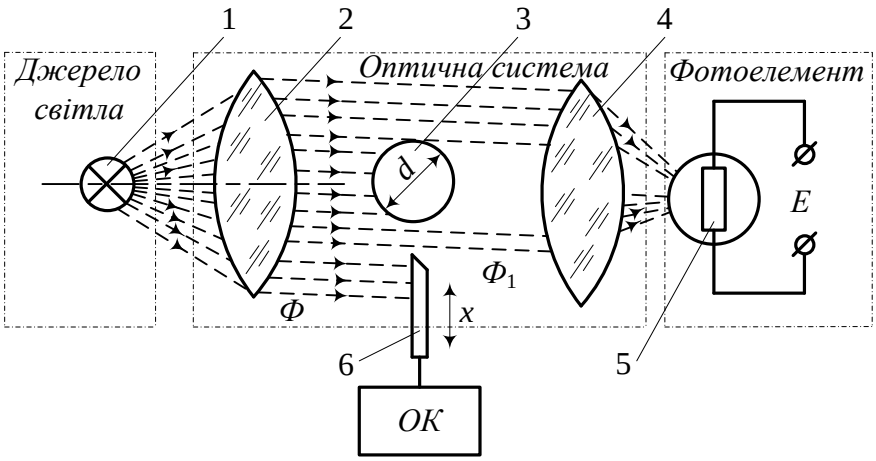


Рис. 2.21. Фотоелектричний перетворювач зі світловим потоком, що переривається об'єктом:

1 – джерело світла; 2-4 – оптична система; 3 – деталь, розміри якої контролюються; 5 – фотоелемент (чутливий елемент); 6 – заслінка

У більшості фотоперетворювачів перетворення вхідної неелектричної величини в електричний сигнал здійснюється в два етапи: спочатку відбувається її перетворення в один з параметрів світлового потоку (сили світла, освітленості, спектрального складу і т. п.), а потім цій параметр перетвориться фотоелементом в електричну величину (фотострум, падіння напруги, фото-ЕРС і т. д.).

Принцип дії фотоелектричних перетворювачів (фотоелементів) заснований на явищі фотоелектричного ефекту, відкритого російським ученим

А. Г. Столетовим в 1888 р.

Фотоелектричним ефектом називається явище перетворення світлової енергії в електричну. Воно здійснюється трьома різними способами, у зв'язку з чим розрізняють три різновиди прояву фотоефекту: *зовнішній*, *внутрішній* і *вентильний*:

– зовнішній фотоефект полягає в тому, що під впливом світлової енергії відбувається виліт електронів (емісія) з катода електронної лампи; величина струму емісії залежить від освітленості катода;

– внутрішній фотоефект полягає в тому, що активний опір (електропровідність) напівпровідника залежить від його освітленості;

– вентильний фотоефект полягає в тому, що між шарами освітлюваного провідника і неосвітлюваного напівпровідника, розділених тонким ізоляційним шаром, виникає електрорушійна сила, величина якої залежить від освітленості.

Як чутливі елементи у фотоперетворювачах використовуються фотоелементи (чутливі елементи) із *зовнішнім*, *внутрішнім* і *вентильним фотоефектом*.

Фотоелементи з внутрішнім фотоефектом (фоторезистори) (рис. 2.22, *б*). Явище внутрішнього фотоефекту полягає в тому, що в результаті

поглинання світла в напівпровіднику з'являються додаткові вільні електрони, завдяки чому провідність речовини збільшується, а опір його зменшується.

Принцип дії фоторезистора засновано на використанні внутрішнього фотоефекту, який полягає у залежності кількості вільних електронів у деяких напівпровідниках, а, отже, і їхньої електропровідності (їхнього опору) від освітленості.

Фоторезистор (рис. 2.22, *а*) складається з світлочутливого шару напівпровідника 2 товщиною близько 1 мкм, нанесеного на скляну або кварцеву пластинку 3.

На поверхні напівпровідника укріплені токознімні електроди 1 (зазвичай золоті). Чутливий до світла елемент зі струмознімними електродами вмонтовується в пластмасовому корпусі так, щоб виступаючі електроди забезпечили включення фоторезистору у схему через спеціальну панель. На рис. 2.22, *б* приведено зовнішній вигляд і дани габарити фоторезистору типу ФС-К1.

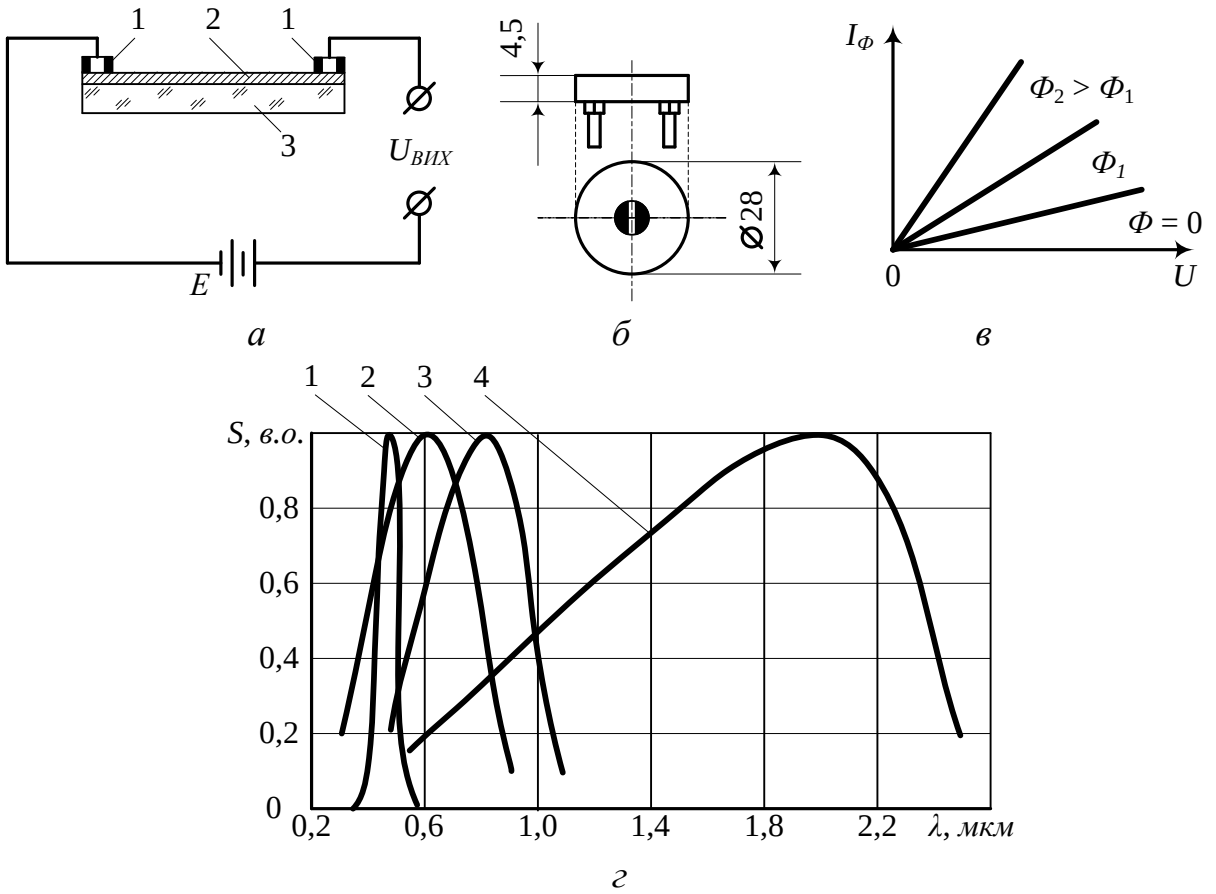


Рис. 2.22. Фоторезистор:

а – принципова електрична схема; *б* – будова;
в – вольт-амперна характеристика; *г* – спектральні характеристики:
крива 1 – фоторезистори з монокристалів сірчистого кадмію (тип ФС-КМ);
крива 2 – з полікристалів кадмію (тип ФС-К); крива 3 – з селеніду кадмію (тип ФС-Д) і крива 4 – з сірчистого свинцю (тип ФС-А)

Робота фоторезистору полягає в тому, що при освітленні електричний опір різко падає і, отже, струм в електричному колі, у яке увімкнено фоторезистор, зростає. Струм через фоторезистор проходить і в темноті, але при освітленні величина струму різко зростає. Струм при $Ф = 0$ називається *темновим струмом* $I_т$, при $Ф > 0$ – *загальним струмом* $I_{заг}$. Різниця цих струмів дорівнює *фотоструму*:

$$I_Ф = I_{заг} - I_т. \qquad (2.48)$$

Мірою чутливості фоторезистору є різниця струмів в темноті і на світлу, віднесена до величини світлового потоку, що потрапляє на фоторезистор.

$$k_Ф = \frac{dI_Ф}{dФ} = \frac{\Delta I_Ф}{\Delta Ф}. \qquad (2.49)$$

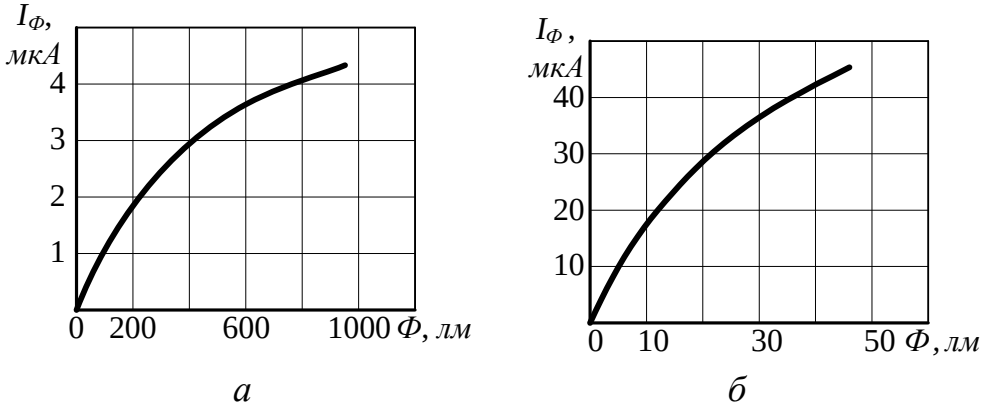
Вольт-амперна характеристика – це залежність струму через резистор від напруги, прикладеної до його виводів, при різних значеннях світлового потоку $Ф$ (рис. 2.21, *в*).

Спектральна характеристика – залежність фотоструму або фотопровідності від довжини хвилі падаючого світла. Спектральна характеристика характеризує чутливість фоторезистору при дії на нього випромінювання певної довжини хвилі.

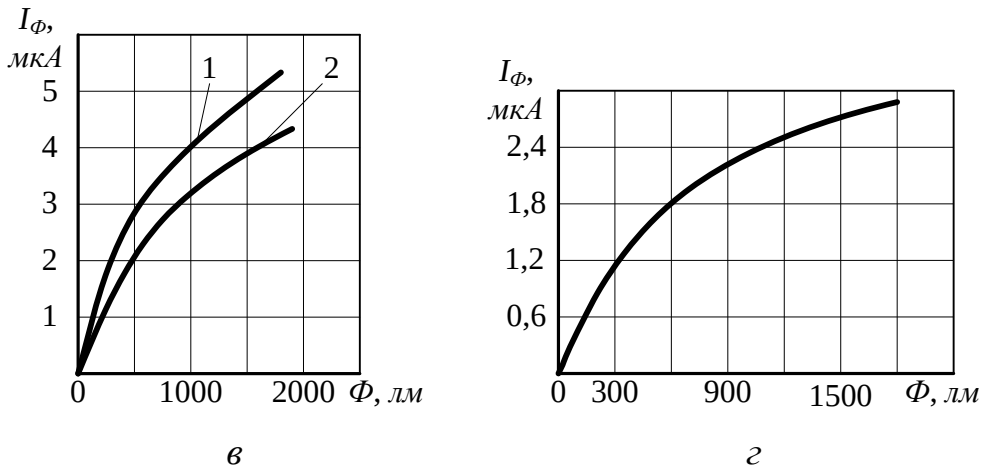
На рис. 2.23, *в* зображено спектральні характеристики фоторезисторів з деяких напівпровідникових матеріалів. По вертикальній осі відкладена чутливість у відносних одиницях, а по горизонтальній – довжина хвилі монохроматичного (тобто певного кольору) світлового потоку.

Світлова (люкс-амперна) характеристика фоторезистора – залежність фотоструму або фотопровідності від величини світлового потоку $Ф$ або освітленості J при незмінній напрузі, прикладеній до фоторезистора (рис. 2.23).

Вигляд спектральної характеристики змінюється з температурою із-за зміни ширини забороненої зони. Оскільки ширина забороненої зони із збільшенням температури може, як зменшуватися, так і збільшуватися, спектральна характеристика різних фоторезисторів відповідно зрушується або в довгохвильову, або в короткохвильову області спектру.



а *б*



в *г*

Рис. 2.23 Світлові характеристики фоторезисторів:
а – для ФС-А1; *б* – для ФС- Б1; *в* – ФС-К1 (крива 1) і ФС-К2 (крива 2); *г* – для ФС-Д1

Вигляд кривої (гострий пік або полога вершина) залежить і від технології виготовлення напівпровідникового матеріалу.

Слід підкреслити, що чутливість фотоопорів у багато разів більше чутливості фотоелементів із зовнішнім фотоефектом. Наприклад, фоторезистор типу *СФЗ-2А* має в освітленому стані струм в 3 *мА*. За відсутності світла і напрузі на фоторезисторі 10 В через нього протікає струм в 2 *мкА*. Таким чином, кратність зміни опору може досягати

$3 \cdot 10^{-3}/(2 \cdot 10^{-6}) = 1500$.

Інтегральна чутливість деяких фоторезисторів, наприклад *ФС-КМ2*, при найбільшій допустимій напрузі складає 3000…10000 *мкА/лм*.

Промисловістю випускаються фоторезистори типів *СФ*, *ФР*, *ФС* різних модифікацій. У них використовуються напівпровідникові матеріали: сірчистий кадмій, сірчистий свинець, германій, індій і ін.

Фоторезистори, що випускаються промисловістю, мають наступні типові позначення: за літерами *ФС*, що позначають фоторезистор, розташовані літери і цифри, що мають відношення до складу матеріалу і до конструкції фоторезистору. Так, фоторезистори з сірчистого свинцю, окрім літер *ФС*, мають літеру *А*, з сірчистого вісмуту – *Б*, з сірчистого кадмію – *К*.

До недоліків фоторезисторів слід віднести їх інерційність. Вона полягає в тому, що при освітленні фоторезистора фотострум не відразу досягає свого кінцевого значення, а при припиненні освітлення струм знижується до вихідного значення також не миттєво, а після закінчення певного часу. Постійна часу фоторезисторів складає десяті і соті долі секунди. Ще одна вада фоторезисторів – залежність опору від температури.

2.3. Електромагнітні перетворювачі

Електромагнітні перетворювачі, застосовані в приладах для технологічних вимірювань (індуктивні, трансформаторні, магнітопружні й індукційні перетворювачі), дуже різноманітні, але всі вони перетворюють вхідні фізичні величини (найчастіше кутові чи лінійні переміщення або

зусилля) у вихідні електричні сигнали з використанням змін магнітних характеристик перетворювачів під впливом перетворюваних фізичних величин.

Перевагами електромагнітних перетворювачів можна вважати простоту, дешевизну та надійність конструкції; високу чутливість; малу масу та габарити, особливо за живлення напругою високої частоти; можливість знімання вихідного сигналу без ковзних контактів; надійність роботи як у діапазоні малих, так і в діапазоні великих переміщень; можливість отримання досить високої потужності вихідного сигналу; більш високий коефіцієнт корисної дії (ККД) порівняно з потенціометричними вимірювальними перетворювачами.

Електромагнітним перетворювачам притаманні такі вади: обмеженість діапазону лінійності статичної характеристики, зумовлена наявністю крайового ефекту; залежність коефіцієнта перетворення від зовнішніх магнітних полів і частоти напруги живлення; можливість (з незначними винятками) роботи лише на змінному струмі; потреба в екрануванні обмоток.

2.3.1. Типи електромагнітних перетворювачів

Електромагнітні перетворювачі призначені для перетворення вхідних фізичних величин (найчастіше кутових чи лінійних переміщень або зусиль) у вихідні електричні сигнали за рахунок зміни параметрів електромагнітного кола. Ці зміни можуть полягати, наприклад, в збільшенні або зменшенні магнітного опору R_M магнітного кола перетворювача при переміщенні осердя. Якщо переміщається не осердя, а обмотка, то відбувається зміна потокозчеплення обмотки. Таким чином, зміни в електромагнітному колі перетворювача можуть бути викликані як переміщенням елементу магнітного кола (осердя або якоря), так і переміщенням елементу електричного кола (обмотки). В результаті таких переміщень змінюється індуктивність обмотки L або її взаємоіндуктивность M_{ij} з обмоткою збудження. Тому в технічній літературі електромагнітні перетворювачі часто називають ***індуктивними***.

Електромагнітні перетворювачі зазвичай розглядають як параметричні, оскільки величини L і M_{ij} залежать від переміщення x: $L = f(x)$, $M_{ij} = f(x)$. Але електромагнітні перетворювачі з взаємоіндуктивністю, що змінюється, можна віднести і до генераторного типу, оскільки в результаті змінюється і ЕРС обмотки, тобто $E = f(x)$.

Оскільки ЕРС у вихідній обмотці з'являється за рахунок зміни коефіцієнта взаємоіндукції з обмоткою збудження, то такі електромагнітні перетворювачі називають ***трансформаторними***. Адже обмотку збудження можна розглядати як первинну обмотку трансформатора, а вихідну обмотку – як вторинну. До генераторних відносяться і ***індукційні*** перетворювачі, у обмотках яких генерується ЕРС залежно від швидкості переміщення:
$E = f(dx/dt)$.

Зміна індуктивності і взаимоиндуктивности може відбуватися і під впливом механічної напруги в осерді електромагнітного перетворювача. Така напруга приводить до зміни магнітній проникності феромагнітного матеріалу

осердя. Електромагнітні перетворювачі, засновані на такому фізичному явищі, називаються ***магнітопружними*** давачами.

За допомогою електромагнітних перетворювачів можна автоматично вимірювати механічні сили, тиск, температуру, властивості магнітних матеріалів, визначати внутрішні порожнини і тріщини в деталях (дефектоскопія), товщину немагнітних покриттів на сталі, витрату рідин і газів в трубопроводах і ін.

Електромагнітні перетворювачі мають слідуючі переваги: простота, дешевизна та надійність конструкції; висока чутливість; мала маса та габарити, особливо за живлення напругою високої частоти; висока надійність за рахунок можливості знімання вихідного сигналу без ковзаючих контактів; можливість живлення від промислової мережі частотою 50 Гц; можливість отримання достатньо високої потужності вихідного сигналу; можливість роботи як в діапазоні малих (долі мм), так і великих (метри) переміщень; більш високий коефіцієнт корисної дії (ККД) порівняно з потенціометричними вимірювальними перетворювачами.

Електромагнітним перетворювачам притаманні такі недоліки: обмеженість діапазону лінійності статичної характеристики, що зумовлено наявністю крайового ефекту; вплив на вихідний сигнал зовнішніх електромагнітних полів і частоти живлячої напруги, що призводить до зміни коефіцієнта перетворення; можливість роботи тільки на змінному струмі (живлення постійним струмом можливо лише для індукційних перетворювачів); потреба в екрануванні обмоток.

Електромагнітні перетворювачі (індуктивні, трансформаторні, індукційні, магнітопружні) набули широкого поширення в системах автоматики.

2.3.2. Індуктивні перетворювачі

Індуктивні перетворювачі належать до класу параметричних. Вимірюване переміщення на вході перетворювача викликає зміну параметрів магнітного і електричного кіл, що, своєю чергою, викликає зміну вихідної величини електричного струму I або напруги $U_{ВИХ}$.

Принцип дії індуктивних перетворювачів засновано на залежності індуктивності L (трансформаторні − взаємної індуктивності M_{ij}) обмоток магнітної системи від положення, геометричного розміру та магнітного стану елементів їх магнітного кола, пов’язаних із перетворюваними фізичними параметрами.

Як відомо, зміна магнітного потоку індукує напругу не тільки в інших провідниках, але й у самій котушці, яка утворює це магнітне поле. Це явище називають *самоіндукцією.* Тож під самоіндукцією розуміють виникнення додаткової напруги індукції у витках котушки, через яку проходить струм. Напрям напруги самоіндукції протилежний зміні струму, яка зумовлює виникнення цієї напруги. Самоіндукція особливо сильно виявляється під час замикання або розмикання кола (це зумовлює повільне зростання струму в разі замикання кола та значне зростання напруги під час його розмикання), пов’язаних із перетворюваними фізичними величинами.

Однотактний індуктивний перетворювач (рис. 2.24, *а*) складається із осердя 2, обмотки індуктивності 3, що живиться перемінною напругою U з частотою від 50 до декількох сотень герц, і рухомого якоря 1.

Під дією вхідного сигналу переміщується якір 1 і змінюється зазор δ, що викликає зміну індуктивності L обмотки і її повного магнітного опору $Z_{м.}$

Вихідний сигнал $U_{ВИХ}$ отримують у вигляді змінної напруги, що знімається з опору навантаження R_H, увімкненого в коло обмотки 3.

Напругу індукції, зумовлену зміною струму ΔI в тому ж колі, визначають за формулою $U = \Delta U / \Delta t$ або $u = -Ldu / dt$, якщо струм змінюється неравномірно. Коефіцієнт пропорційності L називають *індуктивністю* або коефіцієнтом самоіндукції. Його значення залежить лише від конфігурації магнітного кола та матеріалу, розміщеного в магнітному полі.

Індуктивність L та взаємна індуктивність M_{ij} обмоток, розміщених на магнітопроводах, без розсіювання магнітного потоку визначається за формулами відповідно:

$$L_i = \frac{w_i^2}{Z_M}; \qquad M_{ij} = \frac{w_i w_j}{Z_M}, \tag{2.50}$$

де w_i, w_j – кількість витків i-ї та j-ї обмоток.

$$z_M = \sqrt{R_M^2 + X_M^2}$$

повний магнітний опір обмотки; $R_м$, $X_м$ – активна та реактивна складові $Z_м$

При цьому $R_м$ залежить від розмірів і матеріалу магнітопроводу та зазорів:

$$R_M = \sum_{k=1}^{n} \frac{l_k}{\mu_0 \mu_k S_k} + \frac{\delta_з}{\mu_п S_з} \tag{2.51}$$

де l_k, S_k, $\mu_{k:}$ – відповідно довжина, площа поперечного перерізу та відносна магнітна проникність k-i ділянки магнітопроводу; $\mu_0 = 1{,}257 \cdot 10^{-6}$ В·с/(А·м) – магнітна стала; $\mu_п$ – магнітна проникність повітря; $\delta_З$ – довжина повітряного зазору; $S_З$ – площа поперечного перерізу повітряної ділянки магнітопроводу (у зазорі).

А $X_м$ залежить від магнітного потоку та втрат:

$$X_L = (P/\omega)\Phi^2, \tag{2.52}$$

де P − втрати в магнітопроводі за частоти $\omega = 2\pi f$, зумовлені вихровими струмами та гістерезисом; Φ − магнітний потік.

Вихідна напруга перетворювача:

$$U_{ВИХ} = I \cdot Z_M. \tag{2.53}$$

Середнє значення струму в робочому колі перетворювача визначається за виразом:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \tag{2.54}$$

де ω − кутова частота.

Індуктивність обмотки L є функцією розміру зазору з магнітним опором R_M:

$$L = \frac{w^2}{R_M} = \frac{w^2 \mu_П S}{\delta}, \qquad (2.55)$$

де w − кількість витків обмотки; $\mu_п$ − магнітна проникність повітря у зазорі; S − площа поперечного перерізу зазору; довжина повітряного зазору δ.

Ураховуючи, що на практиці для індуктивних перетворювачів виконується умова $R << X_M$ і підставляючи (2.54) в (2.53), отримуємо:

$$U_{ВИХ} = \frac{UR_H}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega \mu_0 S w^2}{\delta}\right)^2}} = \frac{UR_H \delta}{\omega \mu_0 S w^2} = k\delta. \qquad (2.56)$$

Коефіцієнт перетворення $k = \frac{UR_H}{\omega \mu_0 S w^2}$ − величина постійна. Тому статична характеристика $U_{ВИХ} = f(\delta)$ має бути прямою, що проходить через початок координат під кутом $\alpha = arctgk$ (рис. 2.24, *б*, штрихова лінія). Реальна характеристика перетворювача (див. рис. 2.24, *б*, суцільна лінія) відрізняється від ідеальної. Це пояснюється тим, що при малих значеннях δ умова $R << X_L$ стає невірною, оскільки магнітний опір феромагнітної ділянки магнітного кола R_0 стає сумірним з магнітним опором R_M зазору; при великих значеннях падає індуктивність обмотки L і реактивний опір X_L стає сумірним з активним опором магнітного кола, тобто $R \approx X_L$. Це недотримання прийнятих на початку розгляду допущень і приводить до спотворення статичної характеристики.

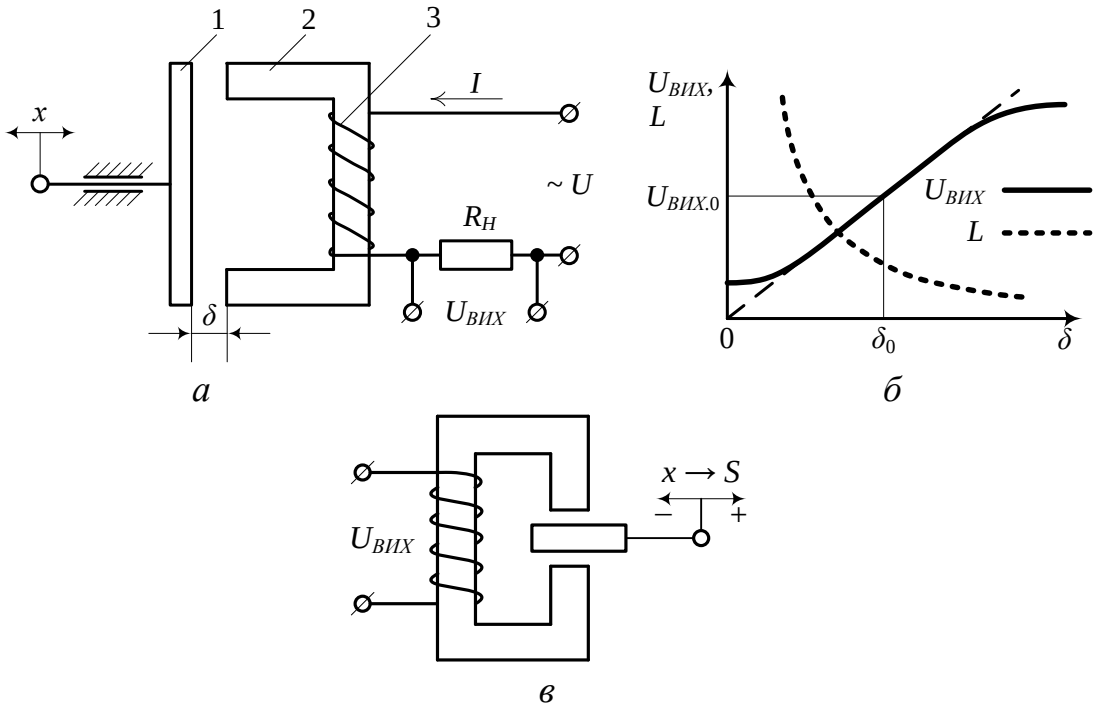


Рис. 2.24 Принципові електричні схеми однотактного індуктивного перетворювача:

а − зі змінною довжиною повітряного зазору (δ = var); *в* − зі змінною площею повітряного зазору (S = var); *б* − статична характеристика;
1 − якір; 2 − осердя; 3 − обмотка

Індуктивні перетворювачі зі змінною довжиною повітряного зазору δ (див. рис. 2.24, *а)* характеризуються нелінійною (близькою до гіперболічної) залежністю $L = f(\delta)$ (див. рис. 2.24, *б*) . Робоче переміщення − 0,01...10 мм.

Індуктивні перетворювачі зі змінною площею повітряного зазору S (рис. 2.24, *в)* дозволяють вимірювати переміщення до 15...20 мм.

Аналіз принципу дії і статичної характеристики однотактного вимірювального індуктивного перетворювача дозволяє виявити наступні його недоліки: фаза вихідного сигналу не залежить від напряму переміщення якоря; для вимірювання переміщення в обох напрямах необхідний початковий зазор δ_0, що призводить до наявності залишкової (початкового значення) напруги $U_{ВИХ.0}$ (див. рис. 2.24, *б*)*;* на якір постійно діє електромагнітна сила, прагнуча притягати його до ярма. При великій потужності сигналу вихідного кола вона може набувати суттєвих значень, що вимагає введення компенсуючих сил, які створюються протидіючими пружинами, а це значно ускладнює перетворювач.

За допомогою індуктивних перетворювачів можна вимірювати порівняно невеликі кутові або лінійні механічні переміщення, зусилля, температуру, діаметр сталевої проволоки, визначати властивості магнітних матеріалів, наявність дефектів, контролювати товщину немагнітного покриття та ін.

Безпосередньо для вимірювальних цілей застосовують двотактні вимірювальні перетворювачі, які можуть включатися за диференціальною або мостовою схемах.

Диференціальна схема включення індуктивного вимірювального перетворювача вимагає використання трансформатора з середньою точкою (рис. 2.25). Обидва осердя ідентичні за своїми конструктивними і магнітними характеристиками. Розташовані на них обмотки w_1 і w_2 мають також однакові параметри і включені послідовно-зустрічно. Опір навантаження R_H включається між середньою точкою трансформатора і середньою точкою обмоток перетворювача.

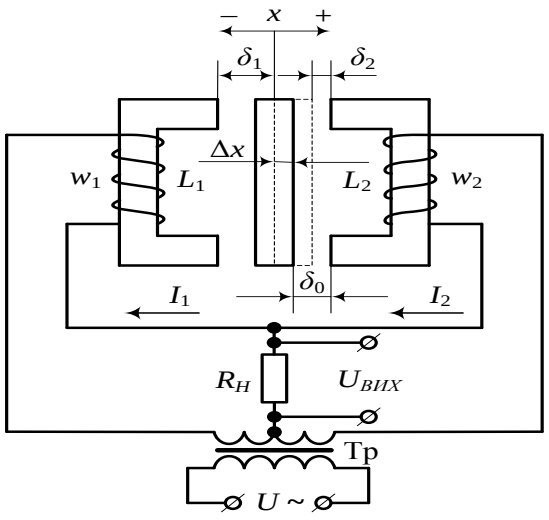


Рис. 2.25. Принципова електрична диференціальна схема індуктивного перетворювача

У такій схемі струм $I_{ВИХ}$, що протікає по опору навантаження, дорівнює різниці струмів правої і лівої половин схеми. У векторній формі ця рівність прийме такий вигляд:

$$\vec{I}_{ВИХ} = \vec{I}_1 - \vec{I}_2, \tag{2.57}$$

а вихідна напруга

$$\vec{U}_{ВИХ} = R_H\left(\vec{I}_1 - \vec{I}_2\right). \tag{2.58}$$

За відсутності вхідного сигналу зазори δ_1 і δ_2 між якорем і ярмом однакові: $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$. Рівні і індуктивності L_1 і L_2 обох половин датчика, визначувані розмірами зазорів. Отже, вихідна напруга перетворювача $U_{ВИХ}$ дорівнює нулю (рис. 2.26, *а*).

При переміщенні якоря на відстань Δx зазори δ_1 і δ_2 стають нерівними:

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta x; \quad \delta_2 = \delta_0 - \Delta x. \tag{2.59}$$

Зміна зазорів приводить до зміни індуктивностей: збільшення δ_1 веде до зменшення L, а зменшення δ_1 − до збільшення L. Зміна індуктивностей плечей перетворювача призводить до дисбалансу струмів I_1 і I_2, внаслідок чого через опір навантаження потече струм $I_H = I_{ВИХ}$, і з'явиться вихідна напруга $U_{ВИХ}$ (рис. 2.26, *б*).

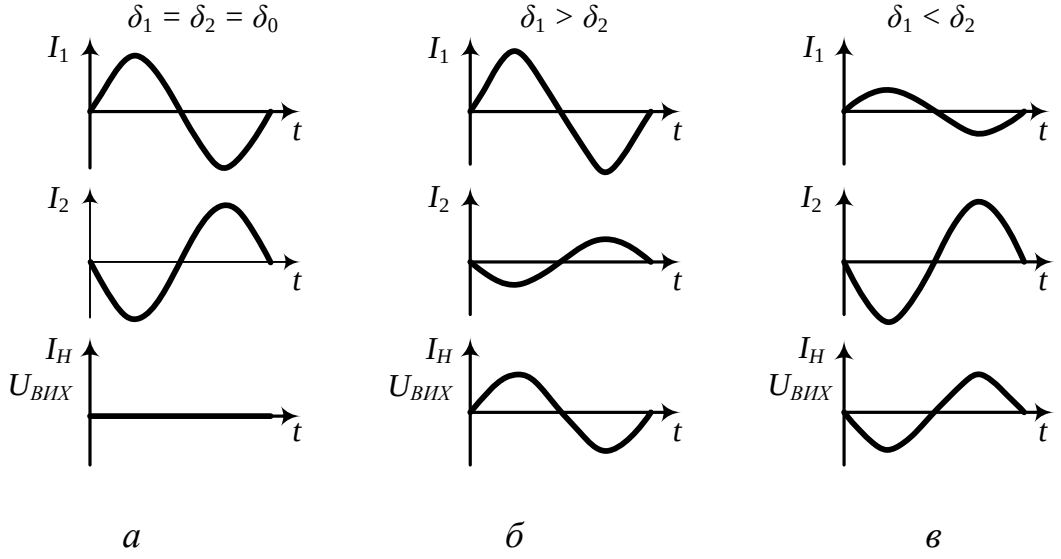


Рис. 2.26 Графіки зміни струмів і напруги за часом в диференціальном індуктивному перетворювачі:

а − $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$; *б* − $\delta_1 > \delta_2$; *в* − $\delta_1 < \delta_2$

Якщо змінюється напрям переміщення якоря, фаза вихідної напруги зрушується на 180° відносно напруги живлення, що є опорною (рис. 2.26 *в*).

Принцип дії індуктивного перетворювача, увімкненого за мостовою схемою (рис. 2.27, *а*) аналогічний принципу дії індуктивного перетворювача, увімкненого за диференціальною схемою.

Вихідна напруга мостової схеми:

$$U_{ВИХ} = U_1 - U_2 = I_1R - I_2R = \mathrm{R}(I_1 - I_2). \tag{2.60}$$

У початковому стані при $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$, $I_1 = I_2 = I_0$, $U_{ВИХ} = 0$, оскільки $I_1 = I_2$. Переміщення якоря управо на відстань Δx призводить до зміни зазорів:

$\delta_1 = \delta_0 + \Delta x$; $\delta_2 = \delta_0 - \Delta x$, а також індуктивностей плечей моста:

$$L_1 = L_0 + \Delta L; \quad L_2 = L_0 - \Delta L. \tag{2.61}$$

Вважаючи, що активний опір обмоток малий в порівнянні з їх індуктивним опором, можна записати комплексні вирази величин I_1 і I_2 в алгебраїчній формі:

$$I_1 = \frac{U}{R + j\omega L_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R + j\omega L_2}, \tag{2.62}$$

де j − уявна одиниця.

Тоді різниця струмів

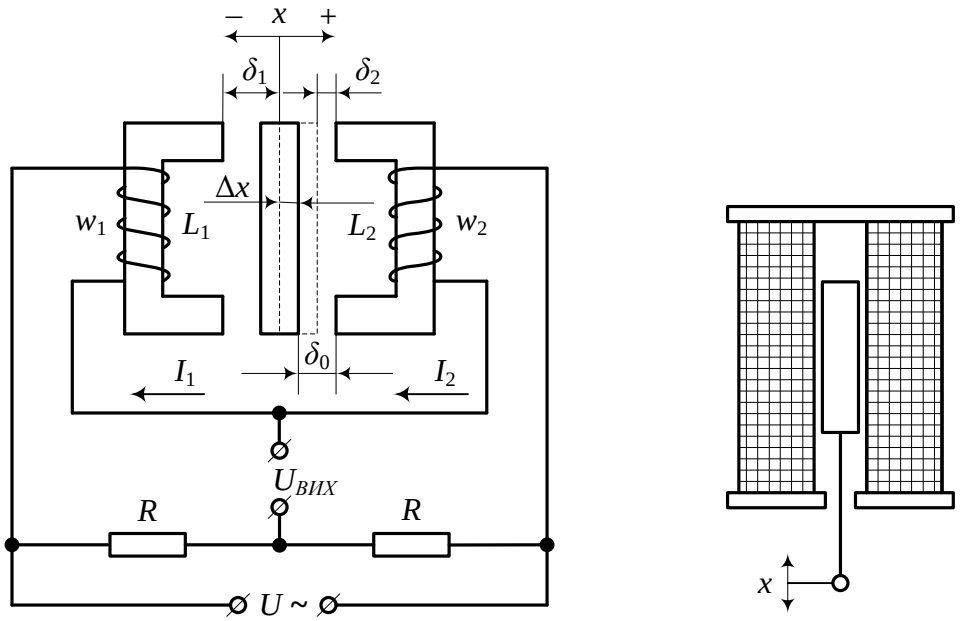
$$I_1 - I_2 = \frac{2jU\omega(L_1 - L_2)}{R^2 + jR\omega(L_1 + L_2) + \omega^2 L_1 L_2}. \tag{2.63}$$

На основі виразу (2.61) можна записати:

$$L_2 - L_1 = 2\Delta L; \quad L_2 + L_1 = 2L_0; \quad L_1 \cdot L_2 = L_0^2 - \Delta L^2 = \Delta L^2. \tag{2.64}$$

При малих змінах зазору δ функція $L = f(x)$ практично лінійна, і для неї справедливе відношення $\Delta L = \frac{L_0}{\delta_0}\Delta x$; відповідно вираз (2.63) матиме вигляд:

$$I_1 - I_2 = \frac{jU\omega L_0}{\delta_0 (R + j\omega L)^2}\Delta x. \tag{2.65}$$



а *б*

Рис. 2.27. Принципові електричні схеми індуктивних перетворювачів:
а − мостова схема; *б* − плунжерна схема з розімкненим магнітним колом

Помноживши і розділивши останній вираз на $(R - j\omega L_0)^2$ і виділивши дійсну і уявну частини, отримаємо модуль різниці струмів I_1 і I_2:

$$|I_1 - I_2| = \frac{2U\omega L_0}{\delta_0 (R^2 + \omega^2 L_0^2)}\Delta x, \tag{2.66}$$

а вихідну напругу згідно формулі (2.60) запишемо у вигляді:

$$|U_{ВИХ}| = \mathrm{R}|I_1 - I_2| = \frac{2U\omega L_0 R}{\delta_0(R^2 + \omega^2 L_0^2)}\Delta x. \qquad (2.67)$$

Оскільки всі параметри за винятком x є постійними, тоді вираз (2.67) можна привести до вигляду:

$$|U_{ВИХ}| = kx, \qquad (2.68)$$

де $k = \frac{2U\omega L_0 R}{\delta_0(R^2 + \omega^2 L_0^2)}$ − коефіцієнт перетворення індуктивного датчика.

Таким чином, статична характеристика двотактного індуктивного вимірювального перетворювача є функцією вигляду $U_{ВИХ} = kx$, що відповідає прямій, що проходить через початок координат під кутом $\alpha = arctgk$ (рис. 2.28).

Як видно з рисунка, при зміні напряму переміщення вхідної величини фаза вихідного сигналу змінюється на 180°. Крім того, із збільшенням вхідного сигналу спостерігається відхилення вихідної характеристики від лінійної, що пояснюється зменшенням індуктивного опору ωL і наближенням його значення до опору навантаження. У зв'язку з цим значення Δx для реверсивних індуктивних перетворювачів не повинне перевищувати $(0{,}3\ldots0{,}4)\delta_0$. У цьому випадку вихідну характеристику можна вважати за лінійну.

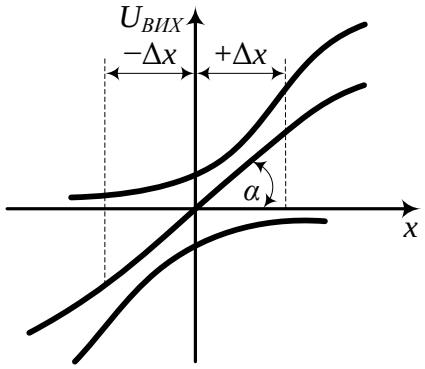


Рис. 2.28 Статична характеристика двотактного індуктивного перетворювача

Двотактні вимірювальні перетворювачі із плоскопаралельним повітряним зазором використовують при вимірюванні малих переміщень від сотих долей мікрометра до 3…5 мм.

Переміщення осердя (якоря) індуктивного перетворювача плунжерного типу з розімкненим магнітним колом (рис. 2.27, *б*) змінює індуктивність котушки. Робоче переміщення − від декількох міліметрів до 100 мм.

Індуктивні перетворювачі мають такі метрологічні характеристики: лінійність − ±0,5...3 % від діапазону вимірювання; гістерезис − +0,1... 1 % від діапазону вимірювання; похибка − 0,5...2 % від діапазону вимірювання; смуга пропускання сигналу не перевищує кількох кілогерців; вихідний сигнал − 100...400 мВ.

Вони мають великі вихідні сигнали і водночас чутливі до вібрацій, ударів, магнітних полів, а також потребують стабілізації живлення за ампліту-

дою й частотою. Вадами таких перетворювачів можна вважати нелінійність характеристики та чутливість до зовнішнього магнітного поля.

2.3.3. Взаємоіндуктивні (трансформаторні) перетворювачі

У трансформаторному перетворювачі, зображеному на рис. 2.29, *а,* змінення повітряного зазору δ зумовлює зміну магнітного опору і взаємної індуктивності *M12* обмоток w_1 та w_2

$$M_{12} = \frac{w_1 w_2}{z_M}; z_M = f(\delta))$$

а отже, й амплітуди змінної напруги на виході.

Перетворювач, зображений на рис. 2.29, *б,* відрізняється тим, що має диференціальну конструкцію: його вихідні обмотки увімкнено зустрічно. Він складається з двох однакових частин, тому, коли не відбувається зміщення якоря (рухомого осердя) відносно нерухомих частин магнітопроводу, у вихідних обмотках w_1 і w_2 індукуються однакові ЕРС. Зустрічне з'єднання обмоток w_1 і w_2 сприяє тому, що вихідний сигнал $U_{вих}$ перетворювача дорівнює нулю. Зі зміщенням якоря в той чи той бік в одному магнітному колі магнітний потік зростає, бо зменшується магнітний опір, а в другому магнітному колі магнітний потік зменшується. Відповідно в одній вихідній обмотці ЕРС збільшується, а в другій − зменшується. Сумарна ЕРС послідовно з'єднаних вихідних обмоток пропорційна значенню переміщення *x* рухомого осердя (у разі переходу через нейтральне положення фаза $U_{вих}$ змінюється на 180°).

Завдяки тому, що обидві частини диференціального чутливого перетворювального елемента однакові за конструкцією, технологією виготовлення і використаними матеріалами, складові їхніх вихідних сигналів від дії неінформативних фізичних величин мають різні знаки і, складаючись, компенсуються.

Перетворювачі з розподіленими магнітними параметрами, зображені на рис. 2.29, *в, г,* призначені для вимірювання великих лінійних переміщень (до 1 м і більше). Перетворювач із розподіленою магнітною провідністю (рис. 2.29, *в*) складається із магнітопроводу 4 з робочою частиною у вигляді двох паралельних смуг, обмотки збудження 1 і пересувної обмотки 2.

У разі переміщення обмотки 2 від положення 3 до положення 5 напруга на вимірювальній обмотці 2 зростає відповідно до збільшення довжини магнітопроводу; при цьому її залежність від *x* майже лінійна, якщо магнітний опір на ділянці 3-5 магнітопроводу малий порівняно з магнітним опором зазору.

Перетворювач, зображений на рис. 2.29, *г,* відрізняється від попереднього тим, що має розподілену вимірювальну обмотку 2, рівномірно намотану на один з довгих стрижнів магнітопроводу 4, та пересувне феромагнітне осердя 3, яке шунтує магнітний потік.

Переміщення магнітного шунта зумовлює лінійну (оскільки змінна величина – кількість задіяних витків вимірювальної обмотки) пов'язану з ним зміну вихідної напруги. Залежно від положення магнітного шунта більша чи менша кількість витків обмотки 2 пронизується магнітним потоком, а $U_{вих} = f(w_2)$, де w_2 – кількість задіяних витків обмотки 2.

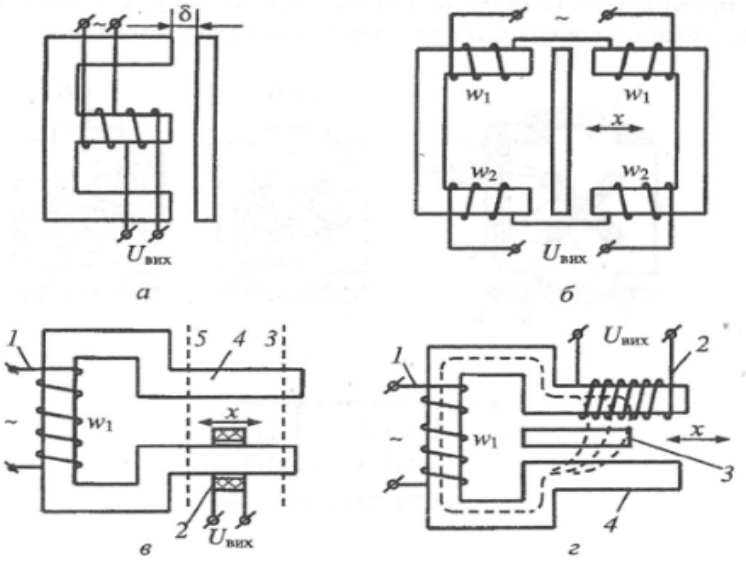


Рис. 2.29 Схеми взаємоіндуктивних (трансформаторних) перетворювачів.

2.3.4. Магнітопружні індукційні перетворювачі

Принцип дії магнітопружних перетворювачів засновано на *магнітопружному ефекті* – фізичному явищі, що виявляється у вигляді зміни магнітній проникності μ феромагнітного матеріалу залежно від механічної напруги в нім. Магнітопружні перетворювачі використовуються для вимірювання силових параметрів: зусиль, тиску, моментів, що крутять і вигинають, механічної напруги і тому подібне.

Конструктивно магнітопружні перетворювачі являють магнітопровід з однією або декількома обмотками. Магнітний опір осердя $R_M = l/(S\mu)$, де l і S – довжина і площа перетину сердечника. Якщо до осердя докладено механічне зусилля F, то магнітна проникність μ зміниться. Отже, зміняться і магнітний опір осердя, і індуктивність обмотки на осерді. Як бачимо, є аналогія з індуктивними перетворювачами. У індуктивних перетворювачів також відбувається зміна магнітного опору, але за рахунок довжини або перетину повітряного зазору. У магнітопружних перетворювачів зазор не потрібний, осердя можуть бути замкнутими.

Так само як і індуктивні перетворювачаі, магнітопружні перетворювачі можуть бути використані у вигляді одинарних (рис. 2.30, *а*), трансформаторних (рис. 2.30, *б*), диференціально-трансформаторних (рис. 2.30, *в*).

За повної симетрії магнітопроводу та ізотропності його матеріалу індуктивного зв'язку між обмотками 1-2 і 3-4 немає, оскільки магнітний потік Φ_0 обмотки 1-2 не перетинає обмотку 3-4 (рис. 2.31, *б*).

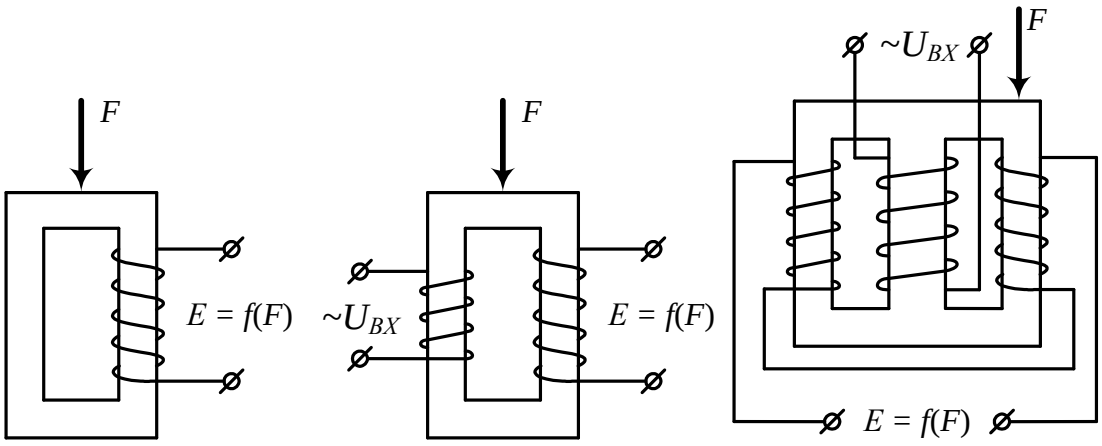


Рис. 2.30 Принципові електричні схеми магнітопружних перетворювачів:
а – одинарного; *б* – трансформаторного; *в* – дифіеренціально-трансформаторного

Отже, якщо не відбувається зовнішнього механічного впливу на магнітопровід ($F = 0$) , то механічних напружень у магнітопроводі не виникає і ЕРС на вихідній обмотці 3-4 дорівнює нулю.

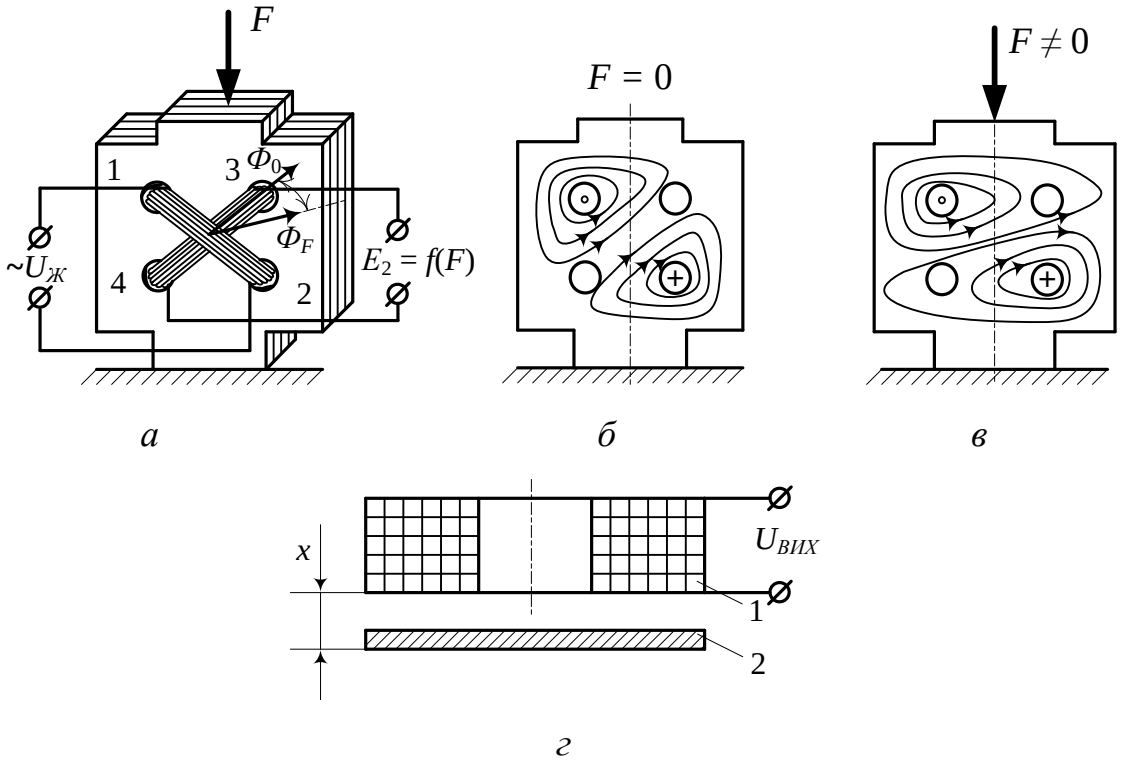


Рис. 2.31. Принципові схеми індукційних перетворювачів:
а, б, в – магнітопружний: 1-2 – первинна обмотка; 3-4 – вторинна обмотка;
г – струмовихровий: 1 – котушка; 2 – пластина (екран)

Якщо на магнітопровід діє механічна сила ($F \neq 0$), то порушується ізотропність його матеріалу, і під дією пружних напружень змінюються його магнітні властивості. Змінюється магнітна проникність у напрямі стиску-

вання, що викликає поворот вектора магнітної індукції на кут α і одночасну зміну магнітного потоку Φ_F.). Потік Φ_F перетинає вихідну обмотку 3-4 (рис. 2.30, *в*), і в ній наводиться ЕРС E_2, пропорційна механічному зусиллю, прикладеному до осердя.

Магнітопружні перетворювачі характеризуються відносною магнітною чутливістю

$$S_\mu = \varepsilon_\mu/\varepsilon_l, \qquad (2.69)$$

де $\varepsilon_\mu = \Delta\mu/\mu$ – відносна зміна магнітної проникності магнітопроводу; $\varepsilon_l = \Delta l/l$ – відносна деформація магнітопроводу.

Відносна зміна магнітної проникності $\boldsymbol{\varepsilon_\mu}$ для різних матеріалів становить 0,5... 3 % від зміни механічного напруження в матеріалі на 1 МПа.

За похибок 1...4 % малогабаритні магнітопружні перетворювачі високонадійні, мають просту конструкцію та високу потужність вихідного сигналу. Робоча характеристика є нелінійною.

Основним матеріалом для виготовлення магнітопружних перетворювачів є пермалойові сплави (заоізокобальтові і залізоникелеві). У цих сплавів найбільш помітний магнітопружний ефект. На рис. 2.32 показано залежність відносної магнітної проникності $\boldsymbol{\varepsilon_\mu}$ від зміни механічного напруження σ. Чутливість пермалойових сплавів змінюється от 220 до 300 одиниць.

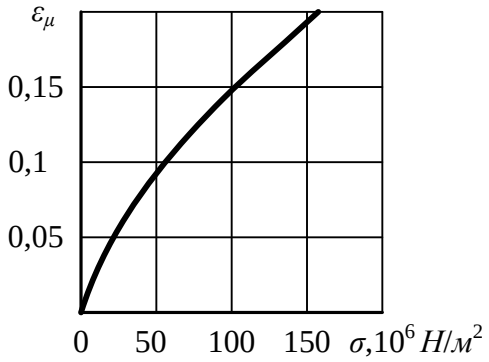


Рис. 2.32 Залежність відносної проникності сплаву від механічного напруження

Магнітопружні перетворювачі використовують для вимірювання великих сил (10 ...10^6 Н), тисків та моментів у важких експлуатаційних умовах.

Струмовихровий індукційний перетворювач, показаний на рис. 2.31, *г,* працює на принципі детектування вихрових (індукційних) струмів. Індуктивність котушки 1 змінюється внаслідок зміни відстані від неї до плоского електропровідного тіла 2 (зазвичай сталевої пластини). Коли силові лінії високочастотного магнітного поля котушки перетинають поверхню сталевої пластини 2, це спричинює появу в сталі ЕРС, і на поверхні пластини виникають вихрові струми. Вони створюють нове магнітне поле, що, у свою чергу, викликає зміну імпедансу (повного опору) детєктувальної котушки, а величина сигналу, який наводиться цими струмами, визначається відстанню *x* між детектувальною котушкою 1 та поверхнею сталевої пластини 2.

Струмовихрові перетворювачі широко застосовуються у сфері безконтактного контролю лінійних розмірів і товщини покриття, а також для ви-

явлення поверхневих дефектів (тріщин, подряпин, відшарувань тощо). Такі перетворювачі, зокрема, використовують у деяких пневмоелектричних перетворювачах.

Величина вихрового струму залежить і від температури пластини 2, тому на основі такого перетворювача створюють також безконтактний індукційний термометр, який застосовується в металургії для вимірювання температури рухомого сталевого листа у діапазоні 25...300 °С з похибкою, що не перевищує ±3 °С.

2.4. Магнітомодуляційні перетворювачі

Магнітомодуляційні перетворювачі (ММП), які ще називають перетворювачами з магнітною компенсацією, перетворюють лінійне переміщення x у сигнал постійного струму. Їх виготовляють з лінійною (для ПВП з пружними ЧЕ для вимірювання тиску, різниці тисків, температури, рівня, густини) або квадратичною (для дифманометрів, які застосовуються для вимірювання витрати рідин та газів за допомогою звужувальних пристроїв) характеристиками.

Структурна схема перетворювача (рис. 2.33) містить у собі: ЧЕ 1, що перетворює вхідний параметр $П_x$ (наприклад, тиск) у лінійне переміщення плунжера $x_{пл}$; магнітний плунжер 2, що перетворює переміщення $x_{пл}$ у керувальний магнітний потік $Ф_м$; магнітний перетворювальний пристрій 3, призначений для перетворення різниці магнітних потоків $\Delta Ф = Ф_м – Ф_{з.з}$, створюваних постійним магнітом 2 та струмом зворотного зв'язку $I_{з.з}$ (в обмотці $W_{з.з}$), в електричний сигнал ΔU; пристрій зворотного зв'язку 6, що дозволяє встановити потрібний закон перетворення (див. п. 3.5.3); напівпровідниковий підсилювач 4, що перетворює ΔU у вихідний сигнал постійного струму $I_{вих} = 0...5$ мА; компаратор (пристрій порівняння) 5, що формує різницю магнітних потоків $\Delta Ф = Ф_м – Ф_{з.з}$.

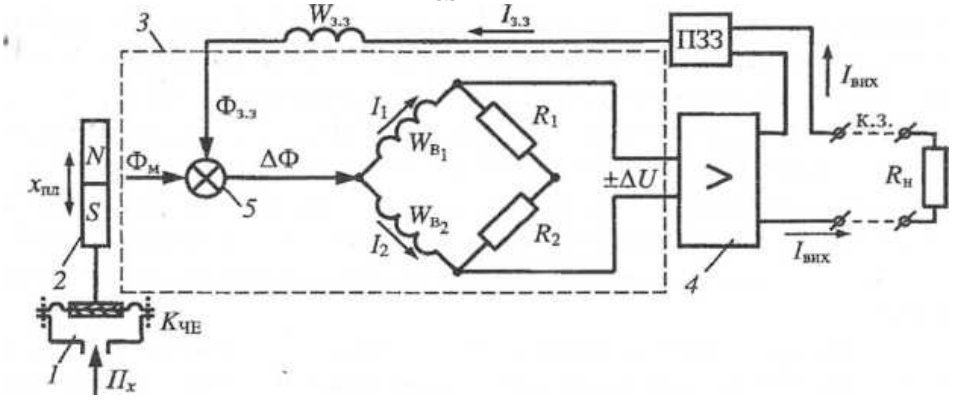


Рис. 2.33. Структурна схема ММП:

1 – ЧЕ; 2 – магнітний плунжер; 3 – магнітний перетворювальний пристрій; 4 – напівпровідниковий підсилювач; 5 – компаратор;
ППЗ – пристрій зворотного зв'язку; к. з. – канали зв'язку

Схему електричної системи передавання вимірювальної інформації на основі ПВП з ММП «переміщення – струм» зображено на рис. 2.34. Ос-

новними вузлами ПВП є ЧЕ та перетворювач «переміщення – струм» (ММП). Чутливий елемент перетворює вимірюваний параметр $П_x$ у лінійне переміщення $x_{пл}$ магнітного плунжера 1, виготовленого у вигляді постійного магніту циліндричної форми.

Магнітомодуляційний перетворювач здійснює перетворення переміщення постійного магніту 1 в електричний сигнал. Для цього використовують магнітну систему із зовнішніх магнітопроводів 5 і 6 та індикаторів магнітних потоків (магнітопроводів спеціальної форми) 2 і 7, кожен з яких має обмотку збудження W_3 та обмотку зворотного зв'язку $W_{з.з}$. Обмотки збудження $Wз_1$ і $Wз_2$, з послідовно ввімкненими діодами $Д_1$ та $Д_2$ (двопівперіодний випрямляч) утворюють плечі незрівноваженого моста.

Двоє інших плечей моста утворюють резистори R_1 та R_2, зашунтовані фільтрувальним конденсатором C (закорочує змінну складову на виході моста; розбаланс ΔU – сигнал постійного струму).

Вимірювальну діагональ cd моста підключено до підсилювального пристрою 8, який містить підсилювач постійного струму та підсилювач потужності. Вихід підсилювального пристрою з'єднується через канали зв'язку з приймачем інформації 9 та через ПЗЗ – з обмотками $W_{з.з}$. Живлення мостової схеми здійснюється напругою у вигляді прямокутних імпульсів частотою 50 Гц.

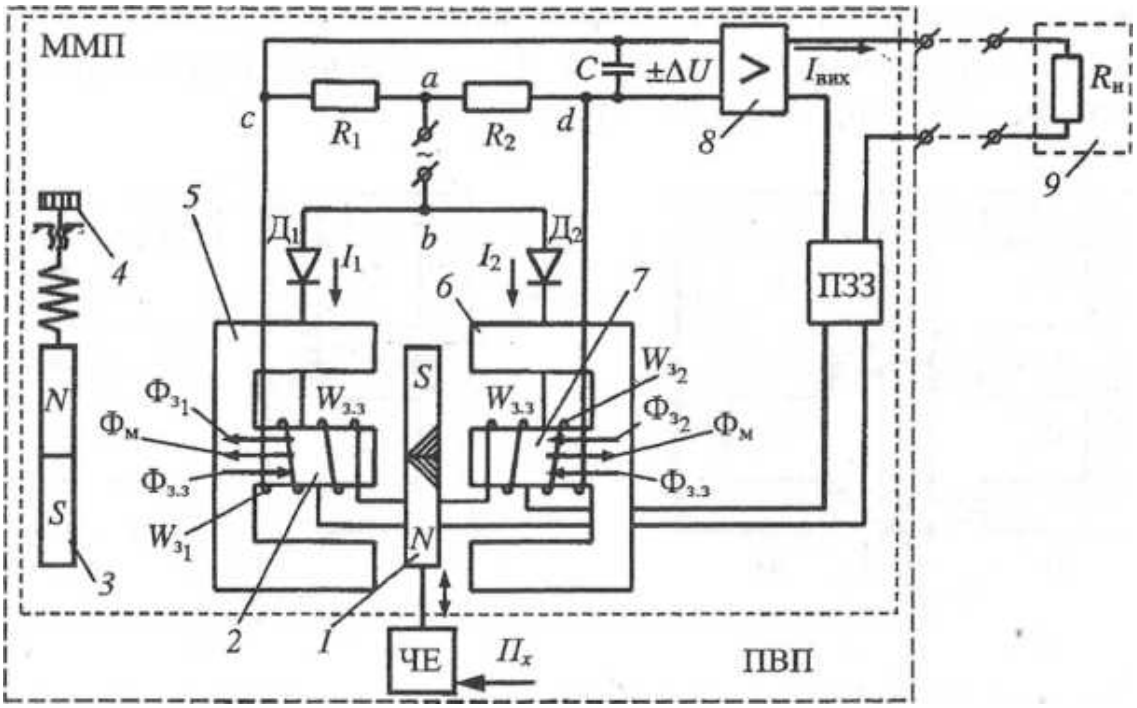


Рис. 2.34. Принципова схема ММП:

1 – магнітний плунжер; 2,7 – індикатори магнітних потоків; 3 – магнітний шунт; 4 – гвинт; 5,6 – зовнішні магнітопроводи; 8 – підсилювач; 9 – приймач інформації

Принцип роботи магнітної системи ММП ілюструє рис. 2.35. У нейтральному положенні (рис. 2.35, *а*) магнітного плунжера 1 відгалужуванні ($Ф_1$ – основний магнітний потік) магнітні потоки $Ф_2$ та $Ф_3$ в магнітопроводі індикаторів магнітних потоків 2 і 7 однакові за величиною і протилежні за знаком, тому сумарний магнітний потік $Ф_м$ дорівнює нулю.

У разі зміщення плунжера від середнього положення (рис. 2.35, б) виникає сумарний магнітний потік $Ф_м$ напрям якого визначається напрямом зміщення плунжера та його полярністю. Розглянемо, як він взаємодіє з магнітними потоками обмоток (див. рис. 2.34). Якщо плунжер 1 перебуває в середньому положенні, то в магнітопроводах індикаторів 2 і 7 наявні лише магнітні потоки $Фз_1$, та $Фз_2$ Ці магнітні потоки зумовлюють одночасне насичення магнітопроводів індикаторів 2 і 7, що відображається на значеннях індуктивності та повного опору обмоток $Wз_1$ та $W з_2$ У результаті в будь-який момент часу $I_1 = I_2$ і міст перебуває в рівновазі.

У разі зміщення положення плунжера 1 в магнітопроводах індикаторів 2 та 7 з'являються магнітні потоки $Ф_м$, котрі разом з магнітними потоками $Фз_1$ і $Фз_2$ (обмотки збудження увімкнено зустрічно та сфазовано так, що магнітний потік однієї з них $Wз_1$ спрямований узгоджено з магнітним потоком постійного магніту $Ф_м$) а другий $W з_2$ – зустрічно) створюють сумарні потоки: $Ф_1* = Ф_м + Фз_1$ і $Ф_2 * = Ф_м – Фз_1$

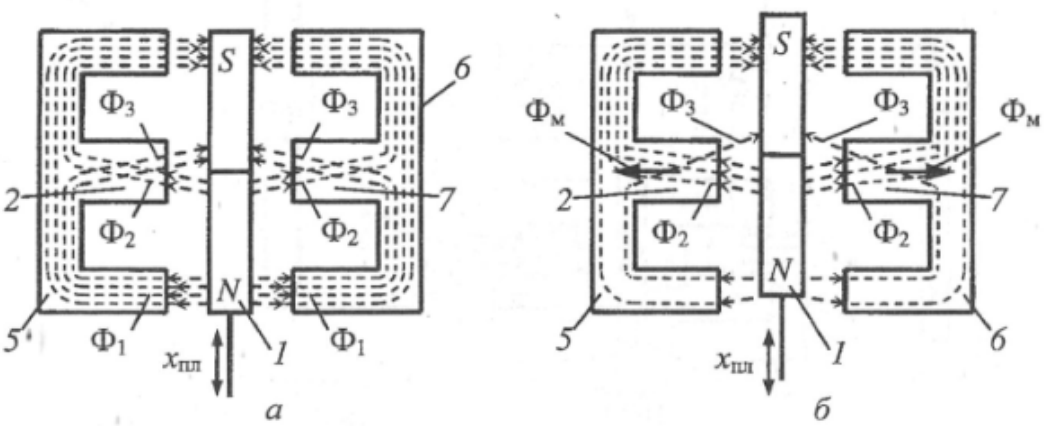


Рис. 2.35. Розподіл магнітних потоків у магнітному перетворювальному пристрої

Під дією більшого магнітного потоку $Ф_1*$ насичення магнітопроводу індикатора 2 настає раніше, ніж насичення магнітопроводу індикатора 7 меншим магнітним потоком $Ф_2*$, тому струм I_1 різко зростає, виводячи мостову схему зі зрівноваженого стану.

Підсилювач формує на виході сигнал постійного струму $I_{вих}$, пропорційний розбалансу мостової схеми. Сигнал $I_{вих}$ каналами зв'язку надходить у приймач інформації 9, а через ПЗЗ – в обмотки $W_{3.3}$. Під час проходження струму $I_{3.3}$ через обмотки $W_{3.3}$ формуються магнітні потоки $Ф_{3.3}$, спрямовані назустріч магнітним потокам $Ф_м$, і забезпечують їх компенсацію.

У результаті компенсувальної дії магнітного потоку $Ф_{3.3}$ на магнітний потік $Ф_м$ рівновага мостової схеми відновлюється і для будь-якого моменту

$I_1 \approx I_2$. Статична характеристика перетворювача визначається залежністю $I_{з.з} = f_{з.з}(I_{вих})$ – Для перетворювачів із лінійною характеристикою ПЗЗ являє собою резистор, а для перетворювачів з квадратичною кореневою характеристикою як ПЗЗ використовують квадратори. Первинний вимірювальний перетворювач на базі ММП настроюють на заданий діапазон вимірювання змінюванням параметрів зворотного зв'язку (наприклад, підбором характеристики опору вказаного вище резистора), а нульовий сигнал – за допомогою гвинта 4, що переміщує магнітний шунт 3.

Сумарний опір зовнішнього навантаження $R_{зв}$ має не перевищувати 2,5 кОм. Перетворювачі з уніфікованим сигналом струму мають класи точності 0,6; 1,0; 1,5.

Магнітомодуляційні перетворювачі, як і, наприклад, нормувальні перетворювачі, належать до пристроїв зі статичною (на відміну, наприклад, від автоматичних приладів серії КС, у яких РД здійснює динамічну компенсацію) компенсацією. Тому в них значення небалансу ΔU не може бути зведено до нуля, а лише до деякої малої величини δU, що називається статичною похибкою компенсації, яка, по суті, і є джерелом виникнення робочого струму в контурі (струму недокомпенсації), пропорційного величині вимірюваного параметра.

2.5. Електростатичні вимірювальні перетворювачі

Найпростіший електростатичний перетворювач містить два електроди площею S, паралельно розташованих на відстані δ в середовищі з діелектричною проникністю ε.

З електричного боку перетворювач характеризується напругою U між пластинами; зарядом $q = CU$, де C – ємкість, рівна $C = \varepsilon\varepsilon_0 S / \delta$; струмом $I = dq / dt$; енергією електричного поля $W_E = qU / 2$.

Якщо одна з пластин (або діелектрик між ними) має можливість переміщатися, то з механічного боку перетворювач характеризується жорсткістю підвісу пластини, її переміщенням x, швидкістю переміщення $u = dx/dt$ і електростатичною силою тяжіння $F_{EC} = dW_E / dx$. Очевидно, що будь-яка дія з механічного боку міняє електричний стан перетворювача і навпаки. Вихідною величиною електростатичного перетворювача може бути:

зміна ємкості C;

сила F_{EC};

ЕРС, що генерується при взаємному переміщенні електродів, що перебувають в електричному полі.

Для електростатичних перетворювачів, в яких змінюється ємкість, вхідними величинами можуть бути механічне переміщення $\boldsymbol{x}$, що змінює зазор δ або площа S, і такі давачі (називаються ***ємкісними***) використовуються в давачах прямого перетворення або як перетворювачі нерівновги у врівноважуючих давачах. Якщо змінюється діелектрична проникність $\boldsymbol{\varepsilon}$ під дією зміни температури або складу діелектрика, то такий вимірювальний перетворювач називається ***діелькометричним***.

2.5.1. Ємнісні вимірювальні перетворювачі

Принцип дії ємкісних вимірювальних перетворювачів засновано на залежності електричної ємкості конденсатора від розмірів і взаємного розташування його пластин (електродів), а також від діелектричної проникності середовища між ними.

Ємність плоского конденсатора визначається виразом:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 S/\delta, \qquad (2.70)$$

де ε − відносна діелектрична проникність діелектрика; ε_0 − діелектрична проникність вакууму, $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-15}$ Ф/м; S − площа пластини; δ − товщина діелектрика або відстань між пластинами.

Опір плоского конденсатора X_c визначаються за формулою:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}, \qquad (2.71)$$

де f − частота напруги живлення.

З приведеного співвідношення видно, що на ємкість конденсатора можна впливати зміною площі перекриття S пластин (рис. 2.36, *а*), відстані між ними δ (рис. 2.36, *б*). Вибір того або іншого змінного параметра залежить від характеру вимірюваної величини.

Ємнісні перетворювачі використовують для виміру кутових і лінійних переміщень, лінійних розмірів, рівня, зусиль, вологи, концентрації і ін.

Конструктивно вони можуть бути виконані з плоскопаралельними, циліндровими, штирьовими електродами, з діелектриком між пластинами і без нього.

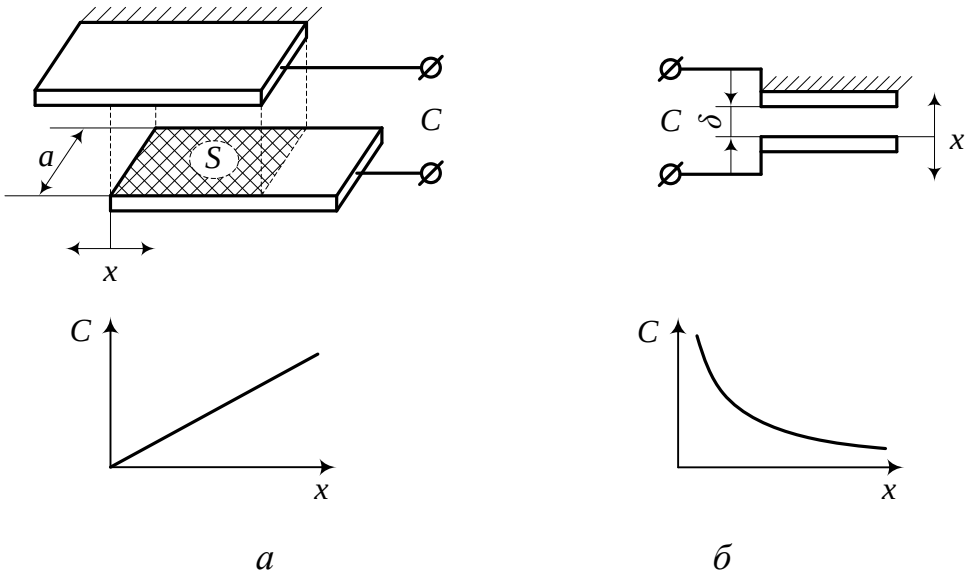


Рис. 2.36. Принципові схеми та статичні характеристики ємнісних перетворювачів з різними змінними параметрами:

а − зміна площі перекриття S пластин; *б* − зміна відстані δ між електродами; *в* − зміна діелектричної проникності речовини **ε** між електродами; *г* − диференціальний перетворювач

Ємнісний плоскопаралельний вимірювальний перетворювач із змінною площею перекриття S (див. рис. 2.36, *а*) описується рівнянням перетворення

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 ax/\delta, \qquad (2.72)$$

де a − ширина пластин конденсатора; x − довжина перекриття електродів. У перетворювачі цього типу під час переміщення пластин відбувається зміна їх активної площі S.

Ємнісні перетворювачі переміщення із змінною площею перекриття (рис. 2.37) використовують і для вимірювання кутових величин.

У цьому випадку ємкість вимірювального перетворювача визначається за виразом:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 (r_2^2 - r_1^2)}{2\delta}(\alpha_0 - \alpha), \qquad (2.73)$$

а чутливість

$$k_S = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 (r_2^2 - r_1^2)}{2\delta}, \qquad (2.74)$$

де r_2, r_1 − відповідно зовнішній і внутрішній радіуси пластин; α, α_0 − відповідно поточний (вимірюваний) і початковий кути перекриття пластин.

З виразів (2.69) і (2.70) видно, що всі вхідні в них величини, крім вимірюваних x або α, постійні, тобто статична характеристика такого ємкісного давача лінійна (див. рис. 2.36, *а*). Перетворювачі такого типу застосовують для вимірювання порівняно великих (до десятків сантиметрів) переміщень.

Ємнісний плоскопаралельний перетворювач переміщення із змінним повітряним зазором δ (див. рис. 2.36, *б*) має нелінійну характеристику. Зміна його ємності описується рівнянням:

$$C_x = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\delta - x}, \qquad (2.75)$$

де δ − початковий зазор; x − переміщення пластини.

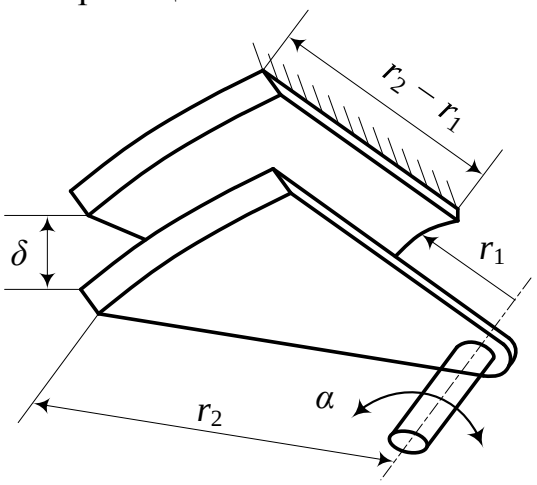


Рис. 2.37. Ємнісний перетворювач для вимірювання кутових величин

У зв'язку з нелінійністю статичної характеристики такі давачі застосовують для виміру відносно малих переміщень, зазвичай не більше 0,1δ.

2.5.2. Діелькометричні вимірювальні перетворювачі

Перетворювачі із змінною діелектричною проникністю середовища ***ε*** *між електродами* (див. рис. 2.38, *а*) широко використовують для вимірювання рівня рідких і сипучих речовин, аналізу складу і концентрації речовин в хімічній, нафтопереробній та інших галузях промисловості, для рахунку виробів, охоронної сигналізації та т. п. Вони мають лінійну статичну характеристику.

Для підвищення чутливості і лінійності характеристик використовують диференціальні перетворювачі (рис. 2.38, *б*) , у яких зміна стану контрольованої величини призводить до зміни ємкості одночасно двох чутливих елементів , що включаються в різні плечі мостовий вимірювальної схеми . У цьому випадку отримують реверсивну (двотактний) статичну характеристику. При зміні напрямку переміщення рухомого елемента вихідний сигнал перетворювача змінює свою фазу на 180° по відношенню до фази напруги живлення датчика , що є опорною напругою.

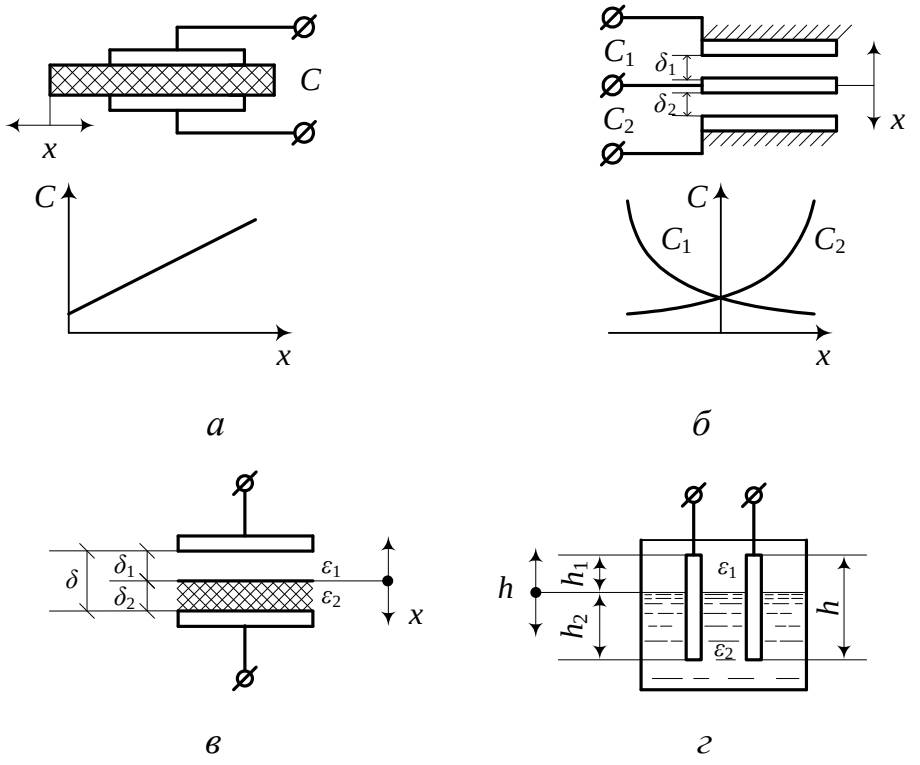


Рис. 2.38. Принципові схеми та статичні характеристики діелькометричних перетворювачів з різними змінними параметрами:
а − зміна діелектричної проникності речовини **ε** між електродами; *б* − диференціальний перетворювач; *в* − перетворювач з двошаровим діелектриком; *г* − перетворювач для вимірювання рідини

Ємкісні датчики з діелектричною проникністю ***ε*** (діелькометричні давачі), що змінюється, застосовують для контролю товщини і вологості твердих діелектриків, а також контролю рівня, складу і концентрації рідких, сухих середовищ. Конденсатор з двошаровим діелектриком (рис. 2.38, *в*)

являє собою два послідовно включених конденсатора, еквівалентна ємкість яких

$$C = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 S}{\delta_1 \varepsilon_2 + \delta_2 \varepsilon_1}. \qquad (2.76)$$

При постійних S і δ зміна товщини (рівня) діелектрика призводить згідно (2.75) до зміни ємкості.

Датчик для вимірювання рівня рідини (рис. 2.38, *г*) є конденсатором, загальна ємкість якого дорівнює ємності двох паралельно включених конденсаторів з діелектричною проникністю ε_1 і ε_2:

$$C = \frac{b(\varepsilon_1 h_1 + \varepsilon_2 h_2)}{\delta} = \frac{\varepsilon_1 bh + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) bh_2}{\delta}. \qquad (2.77)$$

За зміною ємкості, яка в даному випадку лінійно залежить від h_2, контролюють рівень рідини.

Ємкісні давачі, як правило, включають в мостові, резонансні і інші схеми. Для збільшення чутливості ємкісних датчиків часто використовують джерела живлення високої частоти (від 400 Гц до декількох десятків мегагерц). Ємкість вимірювальних перетворювачів залежно від конструктивних особливостей коливається від десятих доль до декількох тисяч пікофарад, що призводить до необхідності використовувати для живлення давачів напругу підвищеної частоти − від 10^3 до 10^8 Гц. Це один із суттєвих недоліків подібних перетворювачів .

Вихідна ємкість перетворювача тим більше, чим менше зазор δ між електродами. Однак зменшення зазору обмежується діелектричної міцністю межелектродной середовища (для повітря, наприклад, напруженість електричного поля не повинна перевищувати 10^5 В/м) і наявністю сили електростатичного притягання пластин

$$F_{EC} = -\frac{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 S}{2\delta^2}. \qquad (2.78)$$

Похибки ємкісних перетворювачів в основному визначаються впливом температури і вологості на геометричні розміри і діелектричну проникність середовища. Зменшити похибки можна, використовуючи конструкційні матеріали з малим температурним коефіцієнтом лінійного розширення , або за допомогою герметизації датчиків.

До переваг ємкісних вимірювальних перетворювачів можна віднести простоту конструкції, малі розміри і масу, високу чутливість, велику роздільну здатність при малому рівні вхідного сигналу, відсутність рухомих струмознімальних контактів, високу швидкодію, можливість отримання необхідного закону перетворення за рахунок вибору відповідних конструктивних параметрів. Ємнісні перетворювачі зазвичай живляться струмом підвищеної частоти, що дозволяє збільшувати потужність вихідного сигналу і зменшувати шунтувальну дію опору ізоляції.

Недоліки ємкісних вимірювальних перетворювачів складаються у відносно низькому рівні вихідної потужності сигналів, нестабільності характеристик при зміні параметрів навколишнього середовища (температури,

вологості), вплив паразитних ємностей, мають нелінійну характеристику (крім перетворювачів зі змінною площею пластин), потребують точного механічного виготовлення порівняно, невеликий коефіцієнт передачі (перетворення), високі вимоги до екранування деталей, необхідність роботи на підвищеній (у порівнянні з 50 Гц) частоті.

2.6. Сельсинні перетворювачі

У сучасній техніці, дуже часто виникає необхідність синхронізації обертання або повороту різних осей механізмів, що перебуваютьна значній відстані один від одного і механічно між собою незв'язаних. Наприклад, на електричній станції необхідний дистанційний контроль положення різного роду засувок і вентилів; на центральному посту управління шлюзом обов'язково контролюють положення щитів, стулок воріт, затворів наповнення камер; на щитку контрольних приладів літака мають бути покажчики положення керма, шасі і др.; у стежачих системах потрібне вимірювання різниці кутів повороту двох осей – кута розузгодження.

Це завдання найчастіше розв’язується за допомогою електричних систем синхронного (сельсинного) зв'язку.

Синхронним зв'язком називається такий електричний зв'язок, який забезпечує одночасне обертання або одночасний поворот двох або декількох механічно незв'язаних осей механізмів, що перебувають на відстані один від одного.

У техніці набули поширення два основні види систем синхронного зв'язку: система електричного валу (синхронного обертання) і система передачі кута (синхронного повороту).

Системи синхронного обертання застосовуються там, де потрібно здійснити синхронне обертання двох або декількох осей механізмів, що знаходяться на відстані один від одного і мають значні моменти опору. Синхронне обертання здійснюється за допомогою звичайних електричних машин, найчастіше трифазних асинхронних двигунів з фазним ротором. Обмотки роторів двигунів в цьому випадку з'єднуються один з одним, обмотки статорів живляться від однієї і тієї ж мережі трифазного струму.

Системи синхронного повороту застосовуються для дистанційного керування, регулювання або контролю. Найчастіше синхронний поворот здійснюється за допомогою невеликих індукційних електричних машин − трифазних або однофазних сельсинів. ***Сельсинами*** (від англійського слова «selfsinchroniring) називаються електричні мікромашини змінного струму, що володіють властивістю самосинхронізації.

Трифазні сельсини конструктивно не відрізняються від звичайних асинхронних машин з фазним ротором. Проста трифазна система синхронного зв'язку є з'єднанням двох однакових сельсинів: приймача і датчика. Сельсини включаються в мережу змінного струму своїми первинними обмотками, якими можуть бути як обмотки статора, так і обмотки ротора (зазвичай первинною є обмотка статора). Кінці відповідних фаз вторинних обмоток обох сельсинів з'єднуються один з одним (рис. 2.39).

Залежно від порядку проходження фаз приймача і датчика сельсини обертаються в одному або різних напрямах.

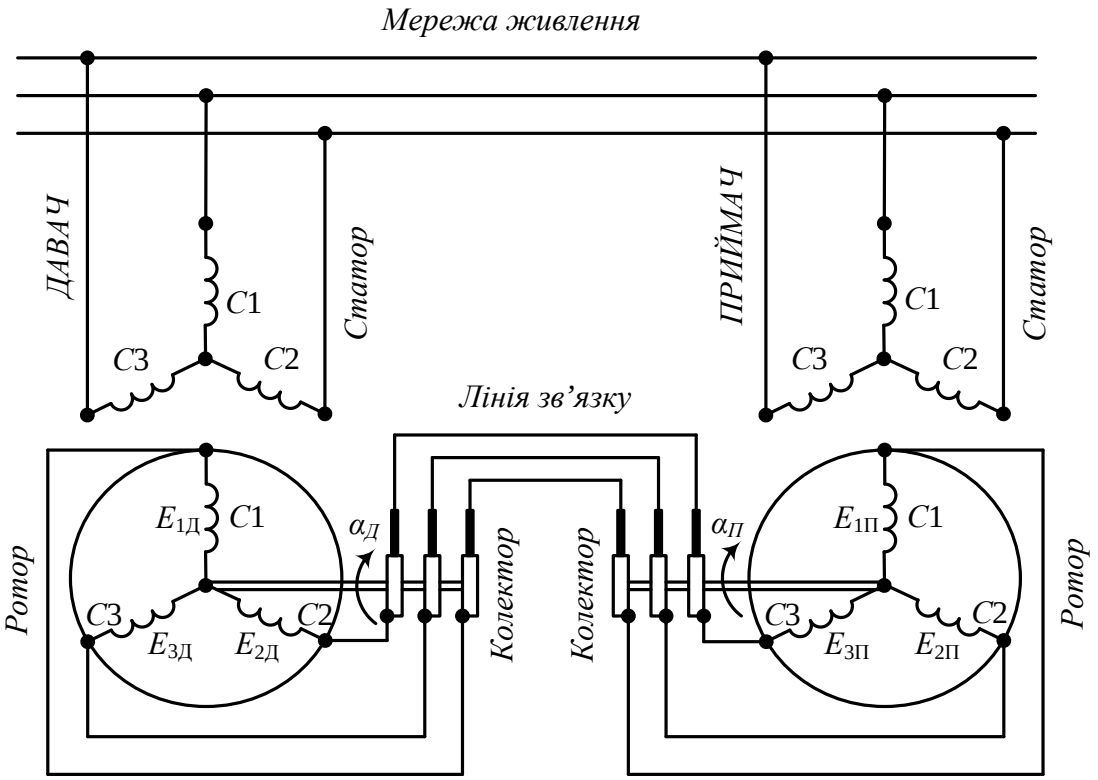


Рис. 2.39. Схема включення трифазних сельсинів

Найбільшого поширення нині набули системи передачі кута, здійснювані за допомогою однофазних сельсинів.

Однофазні сельсини − це звичайно індукційні машини, які мають одно фазну обмотку збудження і трифазну обмотку синхронізації. На рис. 2.40 представлено схему однофазного контактного сельсина з обмоткою збудження на статорі і трифазною обмоткою синхронізації на роторі.

У схемах автоматики використовуються дві принципово відмінні один від одного системи синхронної передачі кута: індикаторна і трансформаторна.

Індикаторна система синхронного повороту застосовується там, де момент опору на веденій осі малий або зовсім відсутній (вісь навантажена стрілкою або шкалою). У індикаторній системі сельсин-приймач (СП) самостійно відпрацьовує кут, що задається сельсином-давачем (СД).

Трансформаторна система синхронного повороту застосовується там, де на веденій вісі є значний момент опору. У трансформаторній системі приймаючий сельсин (сельсин-приймач) відпрацьовує той кут, що задається сельсином-давачем не самостійно, а з допомогою механічно і електрично пов'язаного з ним виконавчого двигуна, тобто сельсин-приймач лише керує силовим електричним двигуном, що здійснює поворот якогось робочого механізму.

Строго кажучи, в кожній схемі повинні використовуватися свої сельсини: індикаторні або трансформаторні, хоча один і той же сельсин може працювати в будь-якій з них.

Сельсини випускаються як на промислову частоту 50 Гц, так і на підвищені частоти 400, 500 Гц.

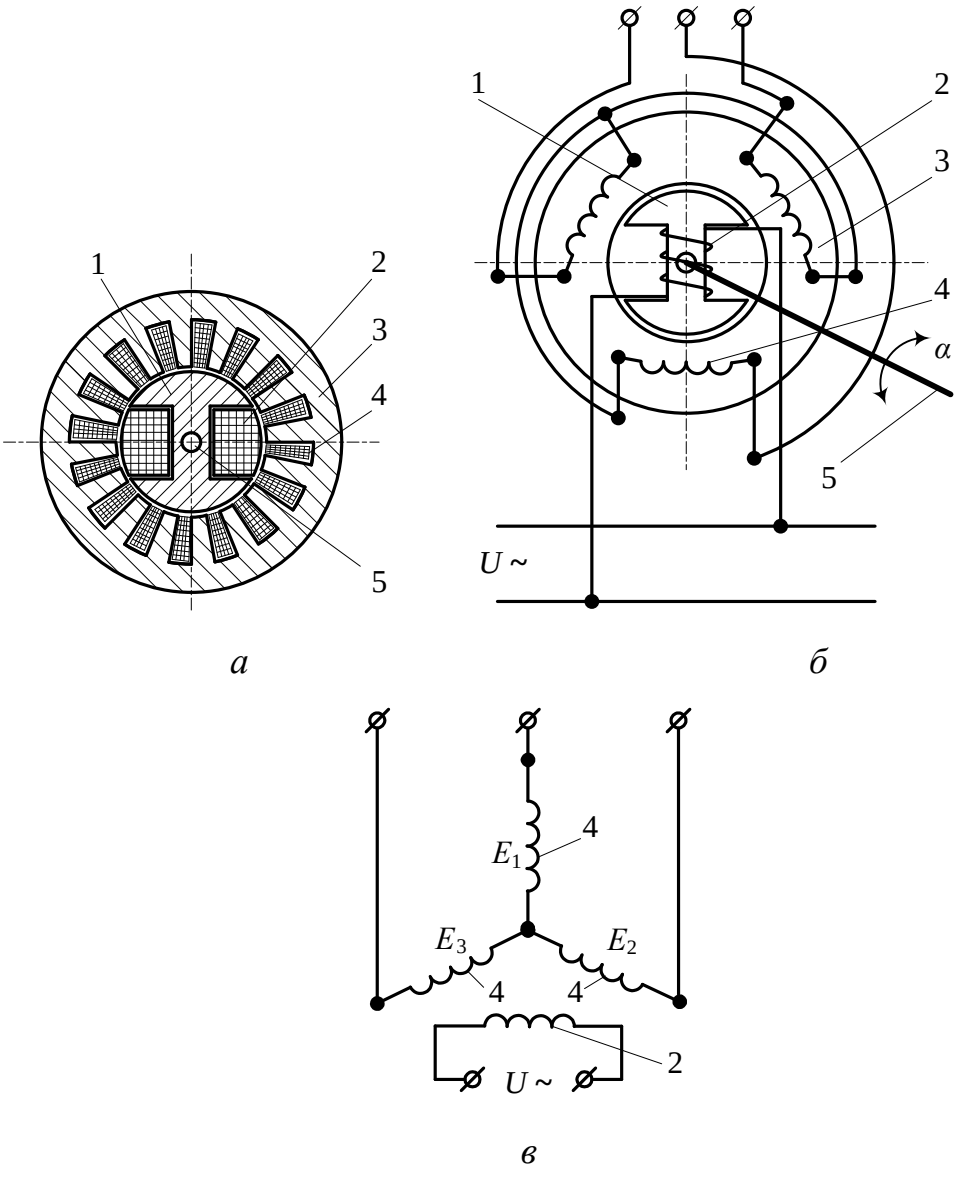


Рис. 2.40. Схеми перетворювача сельсинного типу:

а − будова; *б* − принципова електрична схема; *в* − спрощена електрична схема; 1 − ротор; 2 − однофазна обмотка; 3 − статор; 4 − трифазна обмотка; 5 − вісь ротора

Будова сельсинів. Сельсини складаються із статора і ротора. Вони мають одну обмотку збудження і три, зрушених в просторі на 120° і з'єднаних в «зірку», обмотки синхронізації. Сельсини бувають контактні і безконтактні.

Магнітна система контактних сельсинів може бути неявнополюсною (рис. 2.41, *а*,) або явнополюсною (рис. 2.41, *б*, *в*). Обмотка збудження може

розташовуватися як на роторі, так і на статорі. Перша конструкція переважніша, оскільки має лише два кільця замість трьох.

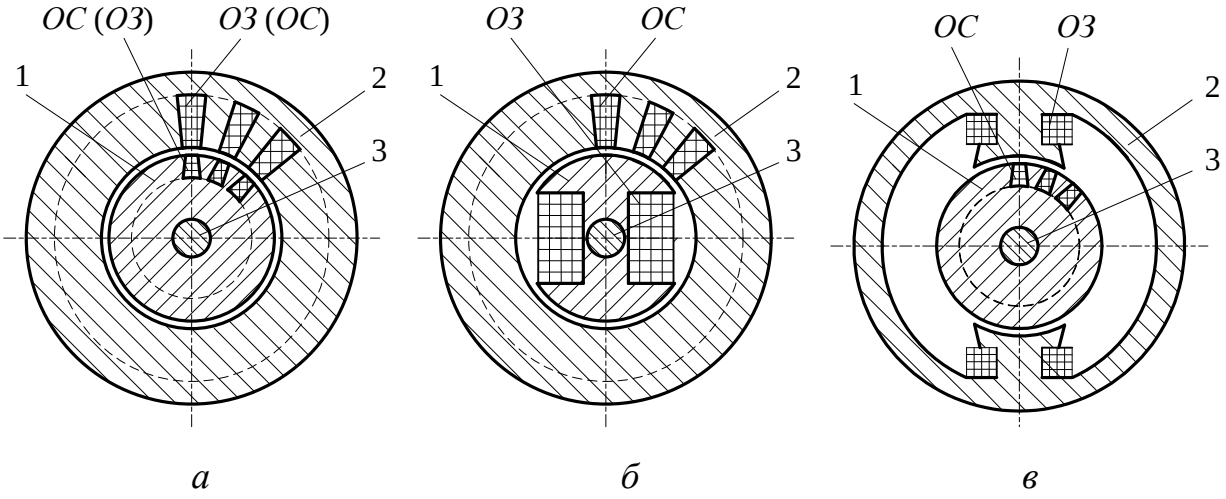


Рис. 2.41. Конструктивні схеми контактних сельсинів:
а − неявнополюсна схема; *б* − явнополюсна схема з ОЗ на роторі;
в − явнополюсна схема з ОЗ на статорі; 1 − ротор;
2 − статор; 3 − вісь ротора

Великою вадою контактних сельсинів є наявність ковзаючого контакту, перехідний опір якого може змінюватися в досить широких межах. Це знижує точність передачі кута і зменшує надійність роботи систем синхронного зв'язку.

Найбільшого поширення набули безконтактні сельсини, що не мають вказаної вади.

Ротор безконтактного сельсина (рис. 2.42) має два сталеві пакети 1, 8, розділених немагнітним матеріалом 2 (зазвичай сплавом алюмінію).

Пакети ротора 2 шихтовані в подовжньому напрямі. Статор складається з осердя 6 і двох кілець 3. У пазах статора укладена обмотка синхронізації 5, виконана за типом трифазної. До кілець примикають пакети зовнішнього магнітопровода 7, теж шихтованих в подовжньому напрямі. Обмотка збудження 4 виконана у вигляді двох кілець.

Магнітний потік, створений обмоткою збудження, із полюса П1 в полюс П2 замикається через бокові кільця 3 і пакет зовнішнього магнітопровода 7, набраного із смуг електротехнічної сталі, а потім через зубці і ярмо пакету статора по шляху, показаному на рис. 2.43. З одного пакету ротора він проходить через невеликий повітряний зазор в статор. Потім по його спинці проходить половину кола і виходить в інший пакет ротора. Відбиваючись від косого зазору, він по кільцю 3 і зовнішньому магнітопроводу 7 знову потрапляє в перший пакет ротора. При повороті ротора змінюється положення потоку збудження відносно обмоток синхронізації, тому ЕРС, індуковані в них, залежатимуть від кута повороту ротора так само, як і в контактному сельсині.

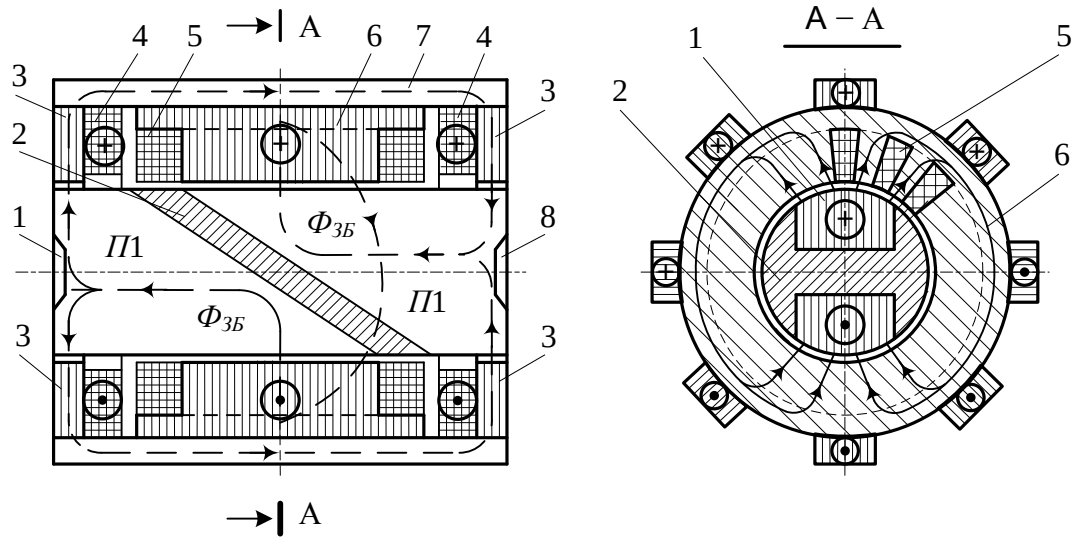


Рис. 2.42. Конструктивна схема і магнітне коло безконтактного сельсина:
1, 8 − сталеві пакети; 2 − немагнітний матеріал; 3 − кільце;
4 − обмотка збудження; 5 − обмотка синхронізації; 6 − осердя;
7 − магнітопровід

Вадою безконтактних сельсинів є гірше використання активних матеріалів. Їх маса приблизно у 1,5 рази більше, ніж контактних. Пояснюється це великими повітряними зазорами, унаслідок чого сельсини мають значні потоки розсіяння і великі намагнічуючи струми.

Робота сельсинів в індикаторному режимі. Індикаторний режим застосовують для контролю і дистанційної передачі кута повороту і різних величин (рівня, тиску, товщини матеріалу, натягнення і т. д.), перетворених заздалегідь в кутове переміщення в тих випадках, коли на виході немає значного обертаючого моменту. У цьому режимі ротор СД зв'язується з віссю механізму, кут повороту якої необхідно передати.

Найпростіша індикаторна система синхронного зв'язку для дистанційної передачі кута складається з двох однакових сельсинів (приймача і давача) і лінії зв'язку (рис. 2.43).

Обмотки збудження (ОЗ) обох сельсинів підключаються до однофазної мережі змінного струму. Кінці фаз С1, С2, С3 обмотки синхронізації приймача з'єднуються лінією зв'язку з кінцями фаз обмотки синхронізації давача. Сельсин-давач входить до складу первинного вимірювального перетворювача, а сельсин-приймач − до складу приймача інформації (вторинного приладу).

Вважатимемо, що обидва сельсини абсолютно однакові і від одного датчика живеться лише один приймач.

Змінні струми $I_{ВД}$ і $I_{ВП}$ обмоток збудження сельсинів створюють магнітні потоки $\Phi_{ВД}$ і $\Phi_{ВП}$, які індукують в обмотках синхронізації сельсинів електрорушійні сили: . Значення ЕРС обмотки тієї або іншої фази залежить від її просторового розташування щодо обмотки збудження.

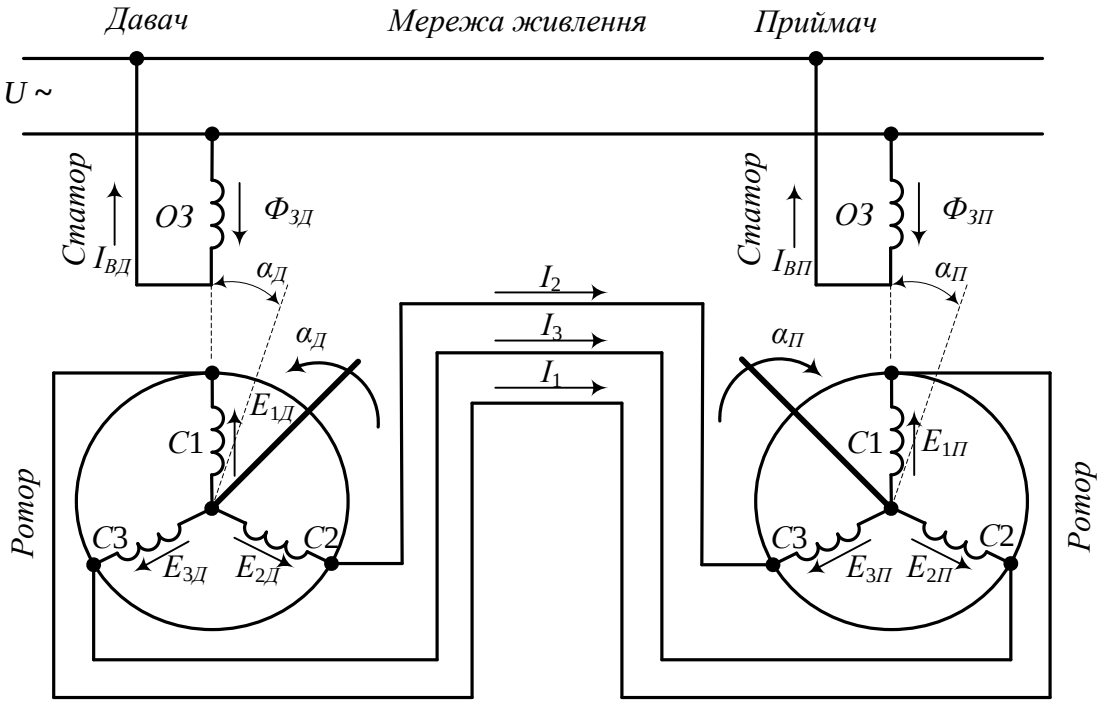


Рис. 2.43. Принципова електрична схема індикаторної системи синхронного зв'язку

Якщо фази обмоток синхронізації давача і приймача розташовані однаково щодо відповідних обмоток збудження, то в сполучених між собою лінією зв'язку обмотках синхронізації приймача і давача індукуються однакові і зустрічно направлені ЕРС. Ці ЕРС врівноважують один одного, і в ланцюзі обмоток синхронізації струм відсутній. Таке положення роторів сельсинів називається узгодженим.

У індикаторному режимі здійснюється дистанційна передача кута. При цьому зовнішній момент навантаження на валу сельсина-приймача практично відсутній. Зазвичай вал сельсина-приймача переміщає повзунок потенціометра, реохорду реостата і тому подібне. Якщо кути повороту обмоток синхронізації сельсина-давача $\boldsymbol{\alpha_Д}$ і сельсина-приймача $\alpha_П$ по відношенню до осей полюсів рівні ($\alpha_Д = \alpha_П$), а обмотки збудження сельсинів включені в одну і ту ж мережу, то пульсуючі магнітні поля $Ф_{ЗД}$ і $Ф_{ЗП}$, створені змінними струмами $I_{ЗД}$ і $I_{ЗП}$ обмоток збудження сельсинів, наведуть в з'єднаних одна з одною однакових обмотках синхронізації однакові ЕРС:

$$E_{1Д} = E_{МАКС}\cos\alpha_Д; \quad E_{1П} = E_{МАКС}\cos\alpha_П;$$
$$E_{2Д} = E_{МАКС}\cos(\alpha_Д - 120^\circ); \quad E_{2П} = E_{МАКС}\cos(\alpha_П - 120^\circ); \qquad (2.79)$$
$$E_{ЗД} = E_{МАКС}\cos(\alpha_Д - 240^\circ); \quad E_{ЗП} = E_{МАКС}\cos(\alpha_П - 240^\circ),$$

де $E_{МАКС}$ − максимальное значення ЕРС, яке виходить при співвісному положенні обмотки синхронізації і обмотки збудження.

Однойменні ЕРС сельсина давача і сельсина-приймача мають зустрічний напрям, тому в обмотках синхронізації не виникає струмів і електромагнітні моменти сельсинів дорівнюють нулю. При цьому синхронизуючий момент $M_{СИН}$ дорівнюватиме нулю.

При повороті давача на кут $\Delta\alpha = \alpha_Д - \alpha_П$ рівність ЕРС порушується

($E_{1Д} \neq E_{1П}$, $E_{2Д} \neq E_{2П}$, $E_{3Д} \neq E_{3П}$). Внаслідок цього в обмотках синхронізації виникнуть струми, які, взаємодіючи з магнітним полем, створять обертаючи моменти.

Моменти, що діють на роторі сельсина-давача і сельсина-приймача, спрямовані в протилежні сторони і під їх впливом кут розузгодження $\Delta\alpha$ зменшується. Якщо при повороті на кут $\Delta\alpha$ ротор сельсина-давача буде закріплений, то ротор сельсина-приймача під дією виниклого моменту також обернеться на кут $\Delta\alpha$ і знову виконається рівність $\alpha'_Д = \alpha'_П$.

В реальних умовах сельсини завжди мають деякі похибки в передачі кута. Ці похибки викликані наявністю тертя в підшипниках і щітках, неточністю виготовлення і т. д. Залежно від класу точності сельсини дозволяють здійснювати передачу кута з похибкою 0,25...2,5 %.

Знайдемо вираз синхронізуючого моменту сельсинів.

Синхронізуючий момент

$$M_{СИН} = M_{МАКС} sin(\alpha_П - \alpha_Д), \tag{2.80}$$

де $M_{МАКС}$ – найбільший момент (якщо $\alpha_П = 90°$).

Оскільки однойменні фази датчика і приймача з'єднані зустрічно, то струм, що проходить по ним:

$$I_1 = \frac{E_{1Д} - E_{1П}}{2Z}; \tag{2.81}$$

$$I_2 = \frac{E_{2Д} - E_{2П}}{2Z}; \tag{2.82}$$

$$I_3 = \frac{E_{3Д} - E_{3П}}{2Z}, \tag{2.83}$$

де Z − повний опір обмотки синхронізації одного з сельсинів плюс половина опору лінії зв'язку.

Підставляючи значення ЕРС, враховуючи, що

$$\cos\alpha_Д - \cos\alpha_П = 2\sin\frac{\alpha_Д + \alpha_П}{2}\sin\frac{\alpha_Д - \alpha_П}{2} \tag{2.84}$$

і позначаючи різницю кутів повороту датчика і приймача через кут розузгодження $\Delta\alpha$, отримаємо

$$I_1 = \frac{E_{МАКС}}{Z}\sin\frac{\alpha_Д + \alpha_П}{2}\sin\frac{\Delta\alpha}{2}; \tag{2.85}$$

$$I_2 = \frac{E_{МАКС}}{Z}\sin\left(\frac{\alpha_Д + \alpha_П}{2} - 120^\circ\right)\sin\frac{\Delta\alpha}{2}; \tag{2.86}$$

$$I_3 = \frac{E}{Z}\sin\left(\frac{\alpha_Д + \alpha_П}{2} - 240^\circ\right)\sin\frac{\Delta\alpha}{2}. \tag{2.87}$$

Якщо один із сельсинів зафіксувати, а іншій повертати на кут від 0° до 360°, то залежність струмів від кута розузгодження матиме вигляд, показаний на рис. 2.44. Із формул струмів та рис. 2.44 видно, що при будь-якому куті

розузгодження сельсинів сума струмів дорівнює нулю. Тому в лініях зв'язку відсутній нульовий провід.

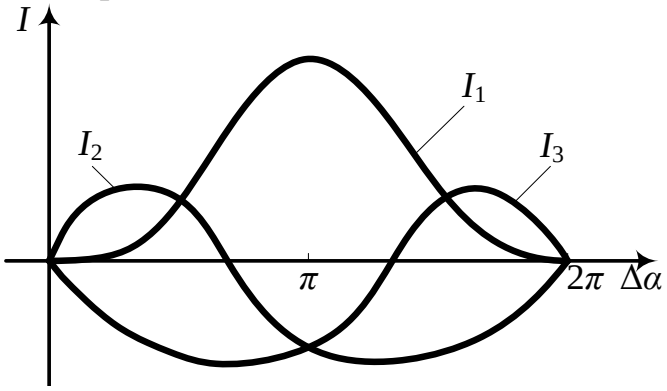
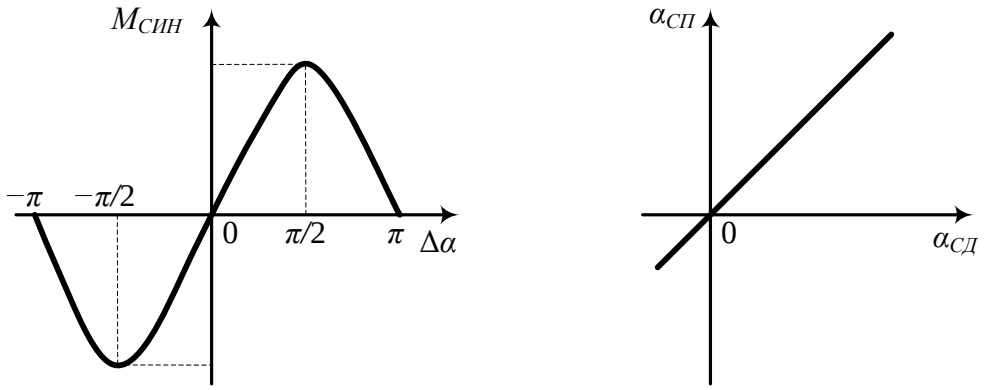


Рис. 2.44. Залежність струмів в обмотках синхронізації у функції кута розузгодження

Моментно-кутова залежність $M_{СИН} = f(\Delta\alpha)$ є статичною характеристикою сельсинної передачі, що працює в індикаторному режимі (рис. 2.45, *а*). При малих кутах розузгодження ($\Delta\alpha < 30°$) статична характеристика лінійна: $M_{СИН} = k\Delta\alpha$,де k = $M_{СИН}/\Delta\alpha$ – коефіцієнт передачі, Н·м/град.

Розглядаючи сельсинну систему, що працює в індикаторному режимі, вхідним сигналом якої є кут повороту ротора СД $\alpha_{СД}$, а виходним – кут повороту ротора СП $\alpha_{СП}$, у сталому стані статичною характеристикою можна вважати і залежність $\alpha_{СП} = f(\alpha_{СД})$, зображену графічно на рис. 2.45, *б*.

Такі схеми з'єднання сельсинів, коли ротор того (давача), що входить до складу первинного вимірювального перетворювача, кінематично сполучений із чутливим елементом, повертається на певний кут, а ротор другого (приймача) відслідковує його положення, називають індикаторним або слідкувальним режимом роботи сельсинних систем.



а *б*

Рис. 2.45. Статичі характеристики сельсинної системи, що працює в індикаторному режимі:

а – залежність $M_{СИН} = k\Delta\alpha$; *б* – залежність $\alpha_{СП} = f(\alpha_{СД})$

Точність роботи сельсинів в індикаторному режимі. Основною вимогою, яка висувається до сельсинів, що працюють в схемах синхронного зв'язку, є точність відробітку сельсином-приймачем заданого сельсином-давачем кута. Точність роботи сельсинів в схемі синхронного зв'язку залежить як від якості роботи (точності) сельсинів-приймачів, так і від якості роботи (точності) сельсинів-давачів.

Точність роботи сельсина-приймача в індикаторному режимі характеризується похибкою $\Delta\delta$, яка визначається як напівсума максимального додатного $\delta_{max.1}$ і максимального від'ємного $\delta_{max.2}$ відхилень ротора приймача від узгодженого з ротором давача положення за один оборот:

$$\Delta\delta = \frac{\delta_{\max 1} - \delta_{\max 2}}{2}. \qquad (2.88)$$

Похибка в статичному режимі визначається шляхом повороту ротора давача спочатку за годинниковою стрілкою на 360°. Вимірювання похибки проводиться або безперервно (за допомогою приладів), або через 1° чи 10° залежно від необхідної точності.

За значенням похибки $\Delta\delta$ в статичному режимі при роботі за схемою «один на один» розрізняють індикаторні сельсини-приймачі чотирьох класів точності: 1-й клас − $\Delta\delta$ не більш ±30′; 2-й клас − $\Delta\delta$ не більш ±45′; 3 клас − $\Delta\delta$ не більш ±60′: 4-й клас − $\Delta\delta$ не більш ±90'.

Точність роботи сельсинів-приймачів в індикаторному режимі визначає ряд параметрів:

питомий синхронізуючий момент $M_П$ − момент, що доводиться на 1° кута розузгодження;

момент опору на валу приймача M_O (зазвичай момент тертя самого приймача $M_O = M_T$);

добротність сельсина − відношення питомого синхронізуючого моменту до моменту тертя ($D = M_П/M_T$);

магнітна і електрична несиметрія;

дисбаланс ротора;

час заспокоєння − час, протягом якого заспокоюється (зупиняється) ротор приймача після розузгодження на ±179°;

точність сельсинів-датчиків, режим роботи і ін.

Робота сельсинів в трансформаторному режимі. Найпростіша трансформаторна система синхронного зв'язку (рис. 2.46) складається з двох сельсинів − приймача і давача, сполучених лінією зв'язку, підсилювача (*П*) і виконавчого механізма (двигуна *М*), вал якого механічно сполучений з валом ротора сельсина-приймача (зворотний механічний зв'язок).

Однофазна обмотка збудження $ОЗ_Д$ сельсина-давача підключається до мережі змінного струму. Струм цієї обмотки створює пульсуючий магнітний потік $Ф_{ЗД}$, який, зчіплюючись з обмоткою синхронізації, наводить в її фазах наступні ЕРС:

$$E_{1Д} = E_{МАКС}\cos\alpha_Д;$$

$$E_{2Д} = E_{МАКС}\cos(\alpha_Д - 120^\circ);$$

(2.89)

$$E_{3Д} = E_{МАКС}\cos(\alpha_Д - 240^\circ),$$

де $E_{МАКС}$ − максимальна ЕРС, така, що наводиться магнітним потоком в одно фазній обмотці збудження давача.

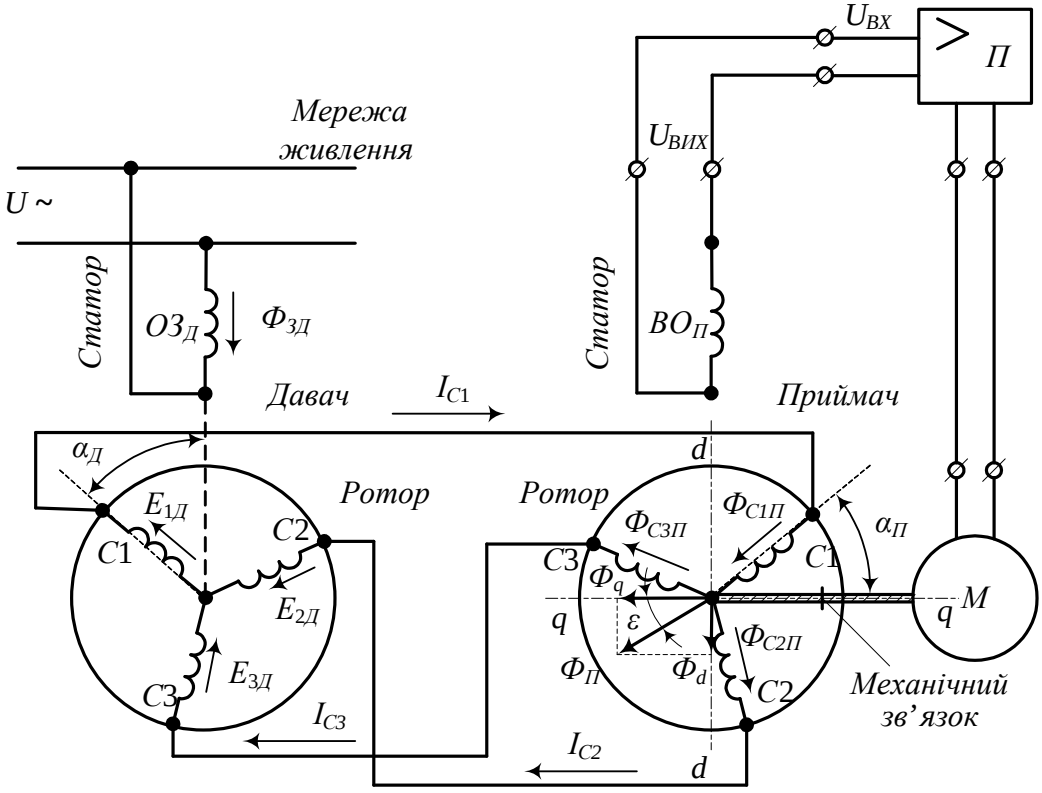


Рис. 2.46. Принципова електрична схема трансформаторної системи синхронного зв'язку

Значення цих ЕРС залежать від розташування фаз обмотки синхронізації відносно обмотки збудження.

Під дією ЕРС $E_{1Д}$, $E_{2Д}$, $E_{3Д}$ ($E_{МАКС}$) в сполучених між собою однойменних фазах обмоток синхронізації давача і приймача, а також в лінії зв'язку виникають струми $I_{С1}$, $I_{С2}$, $I_{С3}$ ($I_Ф$), які визначаються значеннями відповідних ЕРС, а також повними опорами фаз давача $Z_{ФД}$, приймача $Z_{ФП}$ і лінії зв'язку $Z_Л$:

$$I_Ф = \frac{E_{МАКС}}{Z_{ФД} + Z_{ФП} + Z_Л}. \qquad (2.90)$$

Вважаючи, що фази обмоток синхронізації давача і приймача мають однакові опори і включають кожна по половині опору лінії, тобто $Z_{ФД} + Z_Л/2 = Z_{ФП} + Z_Л/2 = Z_Ф$, отримаємо:

$$I_Ф = \frac{E_{МАКС}}{2Z_Ф}. \qquad (2.91)$$

Підставивши у вираз (2.91) значення ЕРС відповідних фаз з формули (2.89), можна знайти струми $I_{С1}$, $I_{С2}$, $I_{С3}$. Ці струми, протікаючи по фазах обмотки синхронізації приймача, створюють пульсуючі магнітні потоки

$\Phi_{С1П}$, $\Phi_{С2П}$, $\Phi_{С3П}$ пропорційні магніторушійним силам фаз $F_{С1П}$, $E_{С2П}$, $E_{С3П}$ і направлені по їх осях.

У двополюсному сельсині магніторушійна сила (МРС) фази (амплітуда її першої гармоніки) може бути знайдена за формулою:

$$F_{\Phi} = 1{,}8 I_{\Phi} k_w w, \qquad (2.92)$$

де w − кількість витків в обмотці фази; k_w − коефіцієнт, залежний від конструкції обмотки.

МРС фаз легко визначити, підставивши у вираз (2.92) струми $I_{С1}$, $I_{С2}$, $I_{С3}$ з формули (2.91) з урахуванням формули (2.89). Магнітні потоки фаз приймача $\Phi_{С1П}$, $\Phi_{С2П}$, $\Phi_{С3П}$ складаючись, утворюють результуючий магнітний потік $\Phi_{П}$ обмотки синхронізації приймача, направлений під деяким (залежним від кута розузгодження) кутом до вихідної однофазної обмотки приймача ($ВО_{П}$).

Потік $\Phi_{П}$, пульсуючи з частотою мережі, наводить у вихідний однофазній обмотці приймача ЕРС, що є вихідною напругою приймача $U_{ВИХ}$:

$$U_{ВИХ} = U_{МАХ} \cos\Delta\alpha. \qquad (2.93)$$

Оскільки нульовий відлік відповідає зсуву роторів СД і СП на 90°, то

$$U_{ВИХ} = U_{МАХ} \cos(\Delta\alpha + 90°) = U_{МАХ} \sin\Delta\alpha. \qquad (2.94)$$

Залежність $U_{ВИХ} = f(\Delta\alpha)$ є статичною характеристикою сельсинної системи, що працює в трансформаторному режимі (рис. 2.47).

Узгодженим положенням сельсинів в трансформаторній системі синхронного зв'язку називається таке положення роторів, при якому вихідна напруга приймача $U_{ВИХ}$ дорівнює нулю. На відміну від узгодженого положення сельсинів в індикаторній системі в цьому випадку поворот ротора сельсина-приймача складає 90°. Внаслідок цього за початок відліку кутів в сельсині-приймачі приймається точка на осі, перпендикулярній осі однофазної вихідної обмотки (див. рис. 2.46).

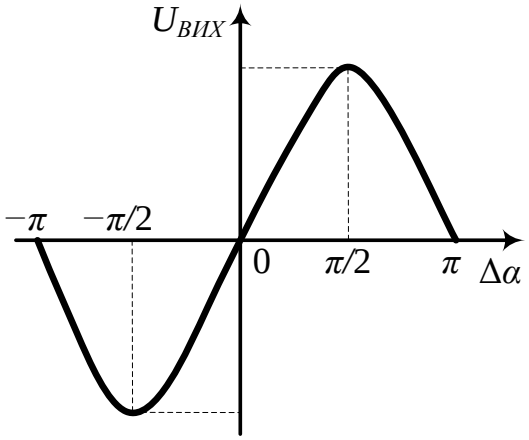


Рис. 2.47. Статичі характеристики сельсинної системи, що працює в трансформаторному режимі

Сельсин-приймач в трансформаторній системі синхронного зв'язку самостійно не відпрацьовує заданий датчиком кут $\alpha_Д$, а лише виробляє ЕРС вихідної обмотки, що змінюється за законом синуса залежно від кута розузгодження ε. Відробіток заданого датчиком кута − поворот ротора сельсина-приймача на кут $\alpha_П = \alpha_Д$ − здійснюється за допомогою виконавчого механізма (двигуна *М*).

Принцип дії трансформаторної системи синхронного зв'язку (див. рис. 2.46) полягає в наступному. При виведенні ротора сельсина-давача з узгодженого положення (повороті на деякий кут $\alpha_Д = \varepsilon$) на вихідній обмотці сельсина-приймача з'являється напруга $U_{ВИХ}$. Ця напруга подається на вхід підсилювача, а потім на обмотку керування виконавчого механізма.

Ротор виконавчого механізма починає обертатися, повертаючи при цьому ротор сельсина-приймача, з яким він механічно зв'язаний. Разом з ротором приймача повертається в просторі і його магнітний потік $Ф_П$; при цьому змінюються потокозчеплення з вихідною обмоткою і її ЕРС (вихідна напруга $U_{ВИХ}$). Ротори двигуна і сельсина-приймача повертаються до тих пір, поки ротор сельсина-приймача не обернеться на заданий давачем кут $\alpha_П = \alpha_Д$ і сельсини не займуть узгоджене положення, в якому потік $Ф_П$ перпендикулярний осі вихідної обмотки $ВО_П$ і вихідна напруга сельсина-приймача $U_{ВИХ}$, а отже, і напруга на підсилювачі і обмотці керування виконавчого механізма, дорівнюють нулю.

На відміну від індикаторної системи синхронного зв'язку по проводах лінії зв'язку трансформаторної системи завжди, навіть в узгодженому положенні, протікають струми. Сельсин-приймач в трансформаторній системі живиться не від мережі (як це має місце в індикаторній системі), а від обмотки синхронізації давача.

Особливість дистанційного передавання з використанням сельсинних перетворювачів полягає в тому, що воно дозволяє з високою точністю передавати на відстань будь-яку потрібну кількість обертів вихідної осі перетворювача, тоді як в інших перетворювачах хід рухомого елемента (наприклад, плунжера ДТП чи ММП) або кут його повороту (рамка ПФ) обмежені.

Сельсинні системи використовують для вимірювання на відстані різних величин (зокрема, рівня) в системах передавання команд, у схемах індикації (наприклад, положення кришок на технологічних апаратах) та сигналізації, в системах автоматичного контролю та регулювання тощо.

Відстань між сельсином-давачем та сельсином-приймачем у системах дистанційного передавання сигналів складає до 2...3 км.

2.7. Тахогенератори

Тахогенераторами називаються невеликі електричні машини, призначені для перетворення механічного переміщення, − частоти обертання валу − в електричний сигнал − вихідну напругу $U_{ТГ}$.

Основна вимога, яка висувається до більшості тахогенераторів, − лінійність вихідної характеристики, тобто пропорційність вихідної напруги $U_{ТГ}$ частоті обертання n (рис. 2.48):

$$U_{ТГ} = kn = k_1 \frac{d\alpha}{dt}, \qquad (2.95)$$

де k, k_1 − постійні величини; α − кут повороту валу.

За родом струму можна розрізняти тахогенератори змінного і постійного струму.

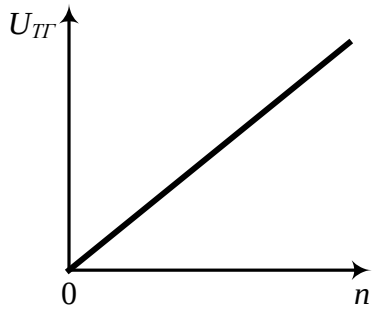


Рис. 2.48. Статична характеристика ідеального тахогенератора

Тахогенератори змінного струму можуть бути асинхронними і синхронними.

Тахогенератори постійного струму можуть бути або з постійними магнітами, або з електромагнітним збудженням (з обмоткою збудження).

Тахогенератори в схемах автоматики використовуються для слідуючих цілей:

вимірювання швидкості обертання вала електричних і теплових машин;

здійснення зворотного зв'язку за швидкістю в стежачих системах;

здійснення електричного диференціювання:

$$U_{ТГ} = k_1(d\alpha/dt); \qquad (2.96)$$

здійснення електричної інтеграції:

$$\alpha = \frac{1}{k_1}\int U_{ТГ}(t)dt\,. \qquad (2.97)$$

Основні вимоги, що висуваються до тахогенераторів:

висока лінійність статичної характеристики − мінімальне відхилення її від прямої $U_{ТГ} = kn$, що є ідеальною статичною характеристикою тахогенератора;

велика крутизна статичної характеристики $k = U_{ТГ}/n$, мВ/(об/хв);

симетрія вихідної напруги: $U_{ТГ}(+n) = U_{ТГ}(-n)$;

мінімальне значення нульової напруги $U_{ТГ}$ при $n = 0$ (у тахогенераторів змінного струму) і мінімальна зона нечутливості (у тахогенераторів постійного струму);

максимальна вихідна потужність при мінімальній споживаній потужності;

мінімальна пульсація вихідної напруги (у тахогенераторів постійного струму);

мінімальна зміна фази вихідної напруги (у тахогенераторів змінного струму);

малий момент інерції ротора і малий момент опору;

стабільність статичної характеристики при зміні навколишніх умов;

малі габаритні розміри і маса;

високі показники надійності (ресурс, інтенсивність відмов і ін.).

До тахогенераторів, призначених для різних цілей, пред'являються різні вимоги. Так, до тахогенераторів, що забезпечують зворотний зв'язок за швидкістю і демпфування стежачих систем, висуваються підвищені вимоги по крутизні статичної характеристики і потужності вихідного сигналу. Лінійність вихідної характеристики для них не грає суттєвої ролі.

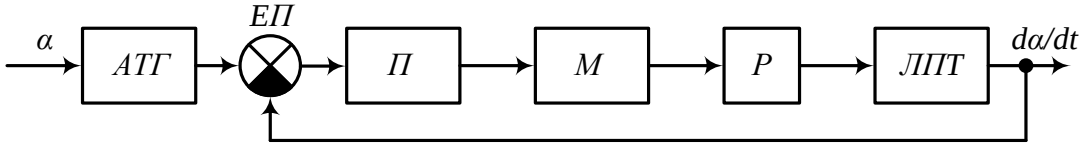
До тахогенераторів, призначених для виконання операцій диференціювання і інтегрування, навпаки, пред'являються підвищені вимоги відносно лінійності, точності, стабільності характеристик, тоді як значення потужності вихідного сигналу і крутизна статичної характеристики тут не є визначальними факторами.

Розглянемо детальніше роботу тахогенераторів як диференціюючих і інтегруючих елементів.

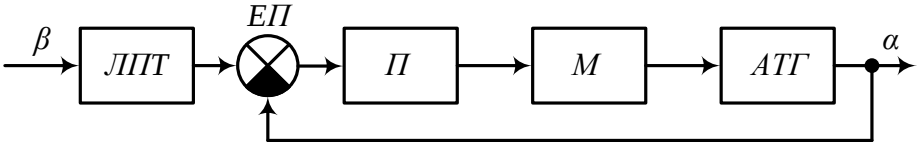
Для диференціювання якої-небудь функції необхідно обертати ротор тахогенератора − повертати його на кути α, пропорційні даній функції. Вихідна напруга U_{TG} при цьому буде прямо пропорціонально похідній заданій функції:

$$U_{TG} = k_1(d\alpha/dt). \qquad (2.98)$$

У тих випадках, коли похідна заданої функції має бути представлена у вигляді кутової величини, необхідно використовувати спеціальну схему (рис. 2.49, *а*), що складається з асинхронного тахогенератора (АТГ), елементу порівняння (ЕП), підсилювача (П), виконавчого механізма (двигуна М), редуктора (Р), лінійного поворотного трансформатора (ЛПТ). Частота обертання ЛПТ пропорційна похідної $d\alpha/dt$.



а



б

Рис. 2.49. Функціональні схеми використання тахогенератора:
а – для диференціювання функцій; *б* – для інтегрування функцій

Для інтегрування заданої функції за часом (рис. 2.49, *б*) потрібно перетворювати її в електричну напругу $U(t)$ і обертати ротор тахогенератора так, щоб його вихідна напруга $U_{ТГ}(t)$ у будь-який момент часу компенсувала напругу $U(t)$. Тоді кут повороту ротора тахогенератора буде пропорційний інтегралу заданої функції за часом:

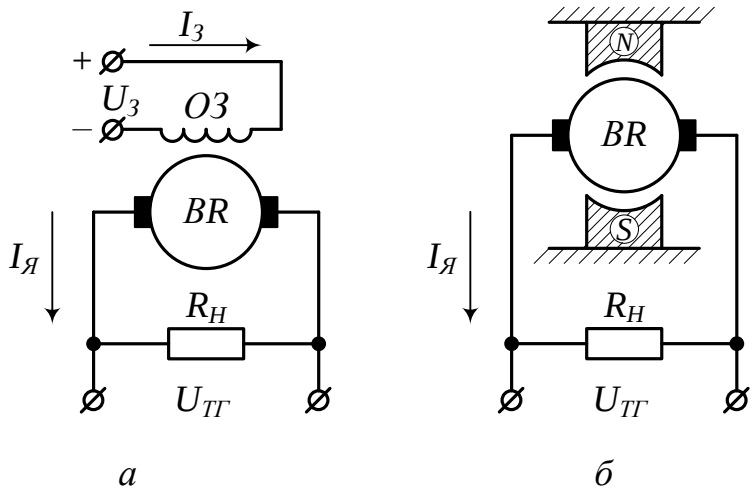
$$\alpha = \frac{1}{k_1}\int U(t)dt = \int \beta dt . \qquad (2.99)$$

2.7.1. Тахогенератори постійного струму

Тахогенератори постійного струму − це невеликі електричні машини постійного струму, що працюють у генераторному режимі, з незалежним електромагнітним збудженням або зі збудженням від постійних магнітів. За конструкцією вони майже не відрізняється від звичайних машин постійного струму малої потужності.

Тахогенератори постійного струму служать для вимірювання частоти обертання за значенням вихідної напруги, а також для отримання електричних сигналів, пропорційних частоті обертання валу в системах автоматичного керування.

На рис. 2.50 наведено принципові електричні схеми тахогенераторів постійного струму з незалежним електромагнітним збудженням (*а*) і зі збудженням від постійних магнітів (*б*). У разі електромагнітного збудження обмотку збудження ОЗ підключають до джерела постійного струму (рис. 2.50, *а*). Тахогенератор збуджується і якщо його якір привести в обертання з частотою *n*, то на виході генератора з'явиться постійна напруга $U_{ТГ}$.



а *б*

Рис. 2.50. Принципові електричні схеми тахогенераторів постійного струму:
а − з електромагнітним збудженням; *б* − із збудженням від постійних магнітів

Вихідну напругу тахогенератора $U_{ТГ}$ може бути виражено так само, як напруга звичайного генератора постійного струму через ЕРС якоря $E_Я$, падіння напруги в обмотці якоря $I_Я R_Я$ і падіння напруги на щітковому контакті $\Delta U_Щ$:

$$U_{ТГ} = E_Я - R_Я - \Delta U_Щ, \qquad (2.100)$$

де $I_Я$ − струм в обмотці якоря; $R_Я$ − опір обмотки якоря.

Виразимо ЕРС якоря $E_Я$ через магнітний потік $Ф$ і частоту обертання n:

$$E_Я = c_E Ф n, \qquad (2.101)$$

а струм якоря $I_Я$ − через напругу на виході $U_{ТГ}$ і опір навантаження $R_Н$ (див. рис. 2.51):

$$I_Я = U_{ТГ}/R_Н, \qquad (2.102)$$

і, підставивши вирази (2.99), (2.98) у вираз (2.97), отримаємо$U_{ТГ} = c_E Ф n -$

$$(U_{ТГ}/R_Н)R_Я - \Delta U_Щ, \qquad (2.103)$$

де c_E − постійна, що визначається конструктивними параметрами генератора.

З виразу (2.103), знайдемо вираз для вихідної напруги тахогенератора $U_{ТГ}$:

$$U_{ТГ} = \frac{c_E Ф n}{1 + R_Я / R_Н} - \frac{\Delta U_Щ}{1 + R_Я / R_Н}. \qquad (2.104)$$

Вираз (2.104) є рівнянням статичної характеристики тахогенератора постійного струму. Якщо нехтувати падінням напруги на щітковому контакті (прийняти $\Delta U_Щ = 0$), то вираз (2.104) прийме вигляд:

$$U_{ТГ} = \frac{c_E Ф}{1 + R_Я / R_Н} n. \qquad (2.105)$$

При постійних магнітному потоці $Ф$, опору якоря $R_Я$ і навантаженні $R_Н$ вихідна напруга тахогенератора $U_{ТГ}$ буде:

$$U_{ТГ} = kn, \qquad (2.106)$$

де величина

$$k = \frac{c_E Ф}{1 + R_Я / R_Н}$$

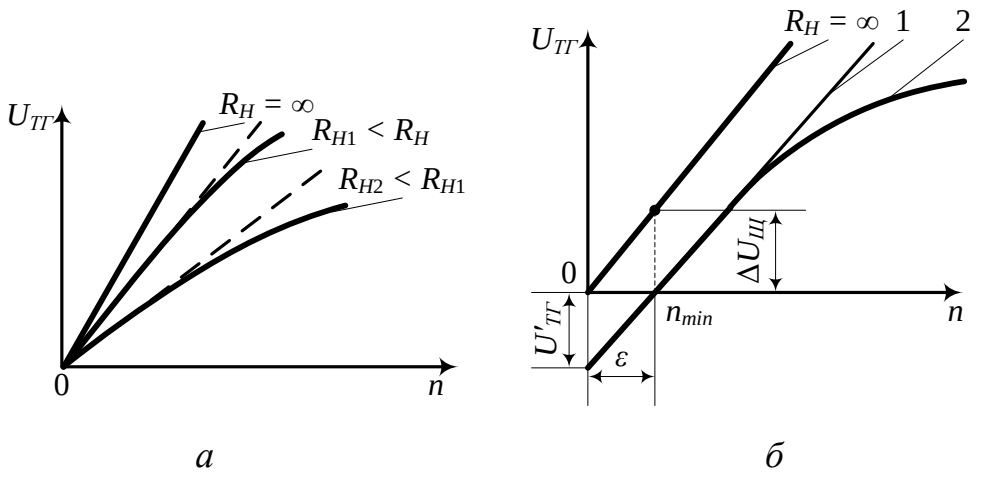
є коефіцієнт перетворення (крутизна) статичної характеристики тахогенератора.

При $Ф = const$, $R_Я = const$ і $R_Н = const$ величина k постійна і статична характеристика тахогенератора (рис. 2.51) є прямою лінією. У сучасних тахогенераторів постійного струму коефіцієнт перетворення k знаходиться в межах від 6 до 260 мВ/(об/хв), що перевищує коефіцієнт перетворення асинхронних тахогенераторів.

Чим більше c_E, $Ф$, $R_Н$ і менше $R_Я$, тим більше коефіцієнт перетворення статичної характеристики тахогенератора. Найбільша крутизна має місце при холостому ході тахогенератора, коли обмотка якоря розімкнена ($R_Н = \infty$, див. пряму 1 на рис. 2.51, *а*):

$$k_{max} = c_E Ф;\ U_{ТГ.max} = E_{Я.max} = c_E Ф n. \qquad (2.107)$$

Чим менше опір навантаження $R_Н$, тим менше крутизна вихідної характеристики (див. прямі $R_Н$, $R_{Н1}$, $R_{Н2}$ на рис. 2.51, *а*).



а *б*

Рис. 2.51. Статичні характеристики тахогенератора постійного струму

Вплив опору щіткового контакту на статичну характеристику легко встановити, аналізуючи рівність (2.104). При $\Delta U_{Щ} \neq 0$, що буває в реальних тахогенераторах, вихідна характеристика $U_{TГ} = f(n)$ перетинає вісь ординат (при $n = 0$) не на початку координат, а в точці $U'_{TГ} = -\Delta U_{Щ}/(1 + R_Я/R_H)$ (див. пряму 1 на рис. 2.51, *б*).

За рахунок падіння напруги на щітковому контакті у тахогенератора постійного струму з'являється зона нечутливості ε − зона частот обертання від $n = 0$ до $n = n_{min}$, при яких вихідна напруга $U_{TГ} = 0$. Межу зони нечутливості легко знайти з виразу (2.104), рахуючи $U_{TГ} = 0$:

$$n_{min} = \Delta U_{Щ}/(c_E \Phi) = \Delta U_{Щ}/k_{max}. \qquad (2.108)$$

В цілях зменшення зони нечутливості необхідно ретельно підбирати щітки, щоб вони забезпечували мінімальне падіння напруги $\Delta U_{Щ}$. У звичайних тахогенераторах встановлюють мідно-графітові або срібно-графітові щітки, а в прецизійних тахогенераторах особливо відповідальних систем автоматики − дротяні щітки з срібним, золотим або навіть платиновим покриттям.

Досвід показує, що статична характеристика тахогенератора постійного струму прямолінійна лише у початковій частині (при малих відносних частотах обертання), а із зростанням частоти обертання вона стає криволінійною (рис. 2.51, *а*). Криволінійність характеристики посилюється при зменшенні опору навантаження R_H і збільшенні частоти обертання n. Це пояснюється розмагнічуючою дією реакції якоря в тахогенераторі. Для зменшення криволінійності вихідної характеристики не слід використовувати тахогенератор на його граничних частотах обертання і застосовувати як навантаження прилади з малим внутрішнім опором.

У тахогенераторах постійного струму технологічна неточність установки щіток на геометричній нейтралі викликає ще один вид похибки − асимметрію вихідної напруги. Вона полягає в тому, що величина вихідної напруги різна при обертанні якоря з однаковою частотою, але в протилежних напрямах. При зсуві щіток з геометричної нейтралі виникає подовжня скла-

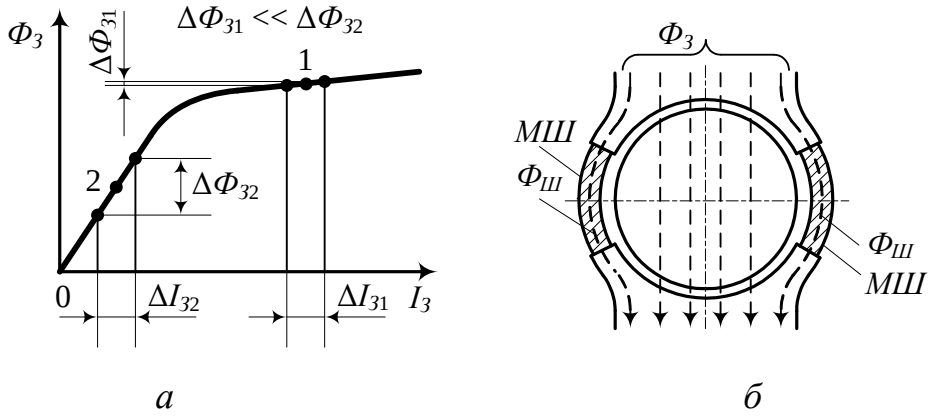
дова потоку якоря, яка при одному напрямі обертання збігається з потоком збудження, а при іншому − протилежна йому. Отже, результуючий потік машини при обох напрямах обертання буде різним, при цьому різними будуть ЕРС, індуковані в якорі.

Асиметрію вихідної напруги обчислюють як відношення різниці вихідної напруги при обертанні якоря з номінальною частотою в обох напрямах до напівсуми цієї напруги. Залежно від класу точності тахогенератора швидкісна амплітудна похибка при номінальній частоті обертання складає ±(0,05…3) %, а похибка асиметрії рівна ±(1…3) %.

Джерелом похибки є також непостійність магнітного потоку обмотки збудження $\Phi_З$. При електромагнітному збудженні тахогенератора причиною цього може бути коливання напруги $U_З$, що підводиться до обмотки збудження, нагрів цієї обмотки.

У обох випадках змінюється струм збудження $I_З$, що веде до зміни потоку $\Phi_З$. Для зменшення можливих коливань потоку $\Phi_З$ магнітну систему тахогенератора виконують з сильним магнітним насиченням, тобто робочу крапку 1 на кривій намагнічення приймають за «коліном» насичення магнітної системи. З побудов рис. 2.52, *а* видно, що зміна струму збудження $I_З$ на $\Delta I_{З1}$ у зоні точки 1 викликає зміну потоку збудження на $\Delta\Phi_{З1}$, значення змін тут набагато менше, ніж в зоні точки 2, лежачою на прямолінійній ділянці кривої намагнічення, розташованій до «коліна» насичення $\Delta\Phi_{З1} << \Delta\Phi_{З2}$.

Сильне магнітне насичення магнітного кола тахогенератора не завжди доцільно, тому що збільшується об'єм обмотки збудження, а отже, габаритні розміри тахогенератора. У тахогенераторах з ненасиченою магнітною системою для обмеження коливань потоку збудження $\Phi_З$ послідовно в коло обмотки збудження включають терморезистор, компенсуючий зміну опору обмотки при коливаннях температури, або застосовують магнітні шунти МШ (рис. 2.52, *б*) виготовлені із сплаву, що змінює свій магнітний опір при зміні температури нагріву.



а *б*

Рис. 2.52. Крива намагнічювання тахогенератора постійного струму (*а*) та магнітопровід з магнітними шунтами (*б*)

Наприклад, при нагріві обмотки збудження її опір збільшується, струм $I_З$ і потік $Ф_З$ зменшуються. Але при цьому магнітний опір шунтів збільшується, що зменшує потік $Ф_Ш$ через шунти і збільшує потік $Ф_З$ через полюс і якір на величину, компенсуючу його зменшення від зміни струму збудження. При зниженні температури процеси йдуть у зворотному напрямі. У результаті відбуваються лише незначні коливання потоку збудження.

Всі причини, що викликають відхилення статичної характеристики

тахогенератора від прямолінійної, ведуть до амплітудної погрішності. Тахогенератори постійного струму мають амплітудну погрішність від 0,5 до 3 %.

У тахогенераторах постійного струму можлива пульсація вихідної напруги, обумовлена рядом причин:

зубчастою поверхнею осерді якорю;

нерівномірністю повітряного зазору або неоднаковою магнітною провідністю осерді якоря за різним радіальними напрямами;

вібрацією щіток і замиканням секцій обмотки якоря в процесі комутації;

невеликою кількістю секцій в обмотці якоря із-за малих габаритних розмірів машини.

Пульсації напруги можуть вносити перешкоди до роботи автоматичних пристроїв, елементом яких є тахогенератори. Пульсації напруги можна ослабити за рахунок якіснішої технології виготовлення тахогенератора із застосуванням віялової збірки листів осерді якоря (листи укладають в пакет із зсувом на однозубцове ділення), а також підключенням згладжуючого фільтру на вихід тахогенератора. Проте повністю позбавитися від пульсацій не вдається. Амплітуда пульсації вихідної напруги тахогенераторів постійного струму складають 0,1…3 % від середнього значення вихідної напруги.

Достоїнства тахогенераторів постійного струму – малі габарити і маса при значній вихідній потужності; можливість застосування збудження постійними магнітами, що дозволяє обійтися без джерела живлення для збудження тахогенератора.

Недоліки – наявність ковзаючого щітково-колекторного контакту, що знижує експлуатаційну надійність і вносить додаткову погрішність. Але, не дивлячись на перераховані недоліки, тахогенератори постійного струму, особливо із збудженням постійними магнітами, набули вельми широкого поширення в електроприводі.

2.7.2. Тахогенератори змінного струму

Асинхронний тахогенератор являє собою двофазну асинхронну машину вельми малої потужності, що працює в режимі генератора.

Він складається із внутрішнього і зовнішнього статора, між якими, в повітряному зазорі обертається тонкий порожнистий немагнітний циліндр. Принципова електрична схема асинхронного тахогенератора показана на рис. 2.53.

На статорі генератора розміщені дві обмотки, просторово зміщені відносно один одного на 90°. Одна з них, обмотка збудження *ОЗ*, підключена до

джерела синусоїдальної напруги, інша обмотка, яка є генератором *ОГ*, включається на вимірювальний прилад або в електричне коло САУ.

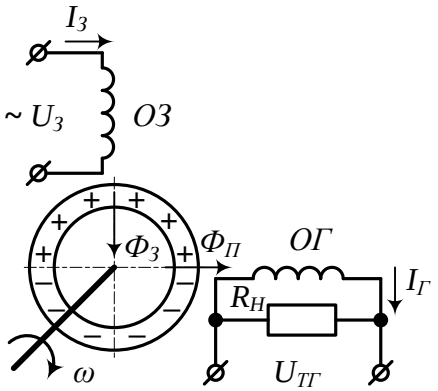


Рис. 2.53. До принципу дії асинхронного тахогенератора

Залежно від місця розташування обмоток розрізняють три конструктивні форми асинхронних тахогенераторів:

з обмотками тільки на зовнішньому статорі;

з обмотками тільки на внутрішньому статорі;

з однією обмоткою на зовнішньому статорі і однією − зазвичай обмоткою збудження − на внутрішньому.

Обмотка збудження створює пульсуючий магнітний потік $Ф_З$.

При нерухомому роторі ЕРС в генераторної обмотці дорівнює нулю, оскільки вектор магнітного потоку $Ф_З$ перпендикулярний осі цієї обмотки.

При обертанні циліндра пульсуючий магнітний потік індукує в ньому ЕРС обертання. Під дією ЕРС в циліндрі з'являються струми, напрямки яких вказані на рис. 2.53. Струми створюють по осі генераторної обмотки пульсуючий поперечний потік $Ф_П$. Цей потік індукує в генераторної обмотці ЕРС, пропорційну частоті обертання циліндра.

Вихідна напруга тахогенератора $U_{ТГ}$ може бути знайдене як падіння напруги на опорі $R_Н$ навантаження:

$$U_{ТГ} = I_Г R_Н. \qquad (2.109)$$

Асинхронні тахогенератори використовуються як датчики кутової швидкості, частоти обертання і прискорень. У останньому випадку обмотка збудження асинхронного тахогенератора підключається до джерела постійного струму.

Достоїнствами асинхронних тахогенераторів є відсутність ковзаючих контактів, що забезпечує йому експлуатаційну надійність і стабільність статичної характеристики, мала інерційність.

До недоліків відносяться: нелінійність статичної характеристики, мала потужність на виході, підвищені габарити (більше, ніж у тахогенераторів постійного струму в 2…3 рази), наявність на виході залишкової ЕРС при нерухомому роторі, мала вихідна потужність.

Незважаючи на перераховані недоліки, асинхронні тахогенератори застосовують в системах електроприводу, що пояснюється їх підвищеною експлуатаційною надійністю.

2.7.3. Синхронні тахогенератори

Синхронні тахогенератори набули нині великого поширення. За конструкцією – це однофазні (а іноді і трифазні) синхронні генератори малої потужності з ротором, що має явно виражені полюси і виконаним у вигляді постійного магніта – зірочки (рис. 2.54). Завдяки виконанню збудження постійним магнітом в синхронному тахогенераторі відсутні ковзаючи контакти, що значно підвищує його надійність.

При обертанні ротора тахогенератора в обмотці його статора наводиться ЕРС, амплітуда якої прямо пропорційна частоті обертання ***n***:

$$E_{TГ} = 4{,}44 f w_{е} \Phi = 4{,}44 (pn/60) w_{е} \Phi = kn, \qquad (2.110)$$

де $f = pn/60$ – частота генеруємої ЕРС; $w_{е}$ – ефективна кількість витків обмотки статора; Φ – магнітний потік; $k = 4{,}44(pw_{е}/60)\Phi$ – постійний (при $\Phi = const$) коефіцієнт, рівний крутизні статичної характеристики; p – кількість пар полюсів.

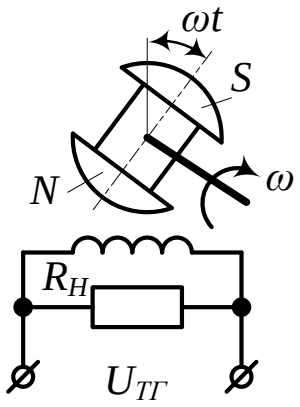


Рис. 2.54. Принципова електрична схема синхронного тахогенератора

Застосування синхронних тахогенераторів у ряді схем скрутно унаслідок того, що у них одночасно з амплітудою при зміні частоти обертання n змінюється і частота f вихідної напруги. Зміна частоти приводить до зміни значення реактивних опорів $X_L = 2pfL$ і $X_C = 1/(2pfC)$ як самого тахогенератора, так і навантаження, на яке він працює. Це веде до спотворення статичної характеристики і до появи погрішностей. За певних умов унаслідок виникнення резонансних явищ робота синхронного тахогенератора не задовольняє вимогам схем автоматики.

У схемах автоматики, що працюють на частотному принципі, непостійність частоти f (пропорційність її частоті обертання n), навпаки, вважається за вельми позитивну якість синхронного тахогенератора.

Позитивною якістю всіх без винятку синхронних тахогенераторів є те, що вони при малих габаритних розмірах мають велику вихідну потужність.

2.8. Імпульсні перетворювачі

Імпульсні перетворювачі перетворюють кутову швидкість (деякі – кут повороту чи лінійне переміщення) в імпульсний електричний сигнал. Найчастіше їх використовують у дискретно-цифрових приладах для вимірювання швидкості обертання.

Таким перетворювачам властиві мізерно мале споживання енергії від об'єкта вимірювання, незначні статичні та динамічні похибки, висока чутливість, висока сумісність з цифровими приладами та системами (до останніх їх підключають тільки через масштабувальні перетворювачі).

Індуктивні імпульсні перетворювачі. Схему частотного індуктивного тахометра показано на рис. 2.55. Вимірювальним елементом перетворювача є стальний диск 1 із зубцями. Під час обертання диска зубці проходять у робочому зазорі δ котушок індуктивності 2, увімкнених у контур високочастотного транзисторного генератора *Г*.

За наявності в зазорі зубця різко погіршується добротність контура через внесені активні втрати, і відбувається зрив коливань генератора. Коли зубець виходить із зазору, ВЧ-коливання відновлюються. Тож відповідній швидкості чередування зубців і впадин диска відповідає певна частота «пачок» ВЧ-коливань, які після підсилення детектуються формувачем імпульсів *Ф* у вигляді однополярних коротких імпульсів. Роздільна здатність датчика – близько 500 імпульсів за оберт.

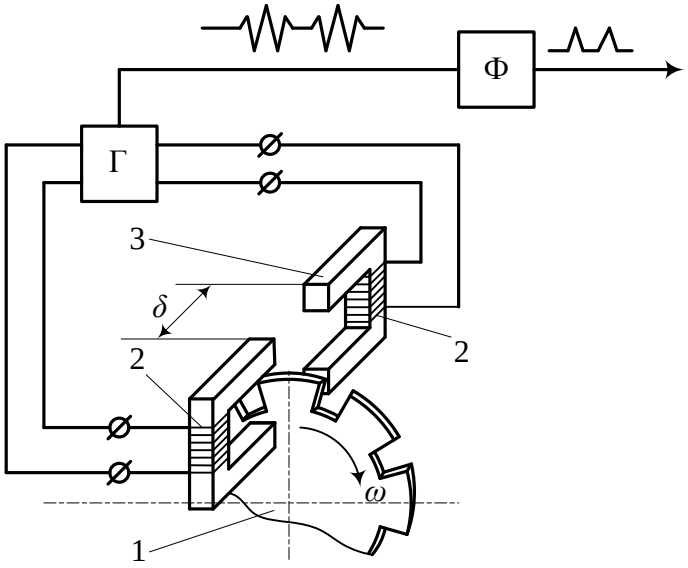
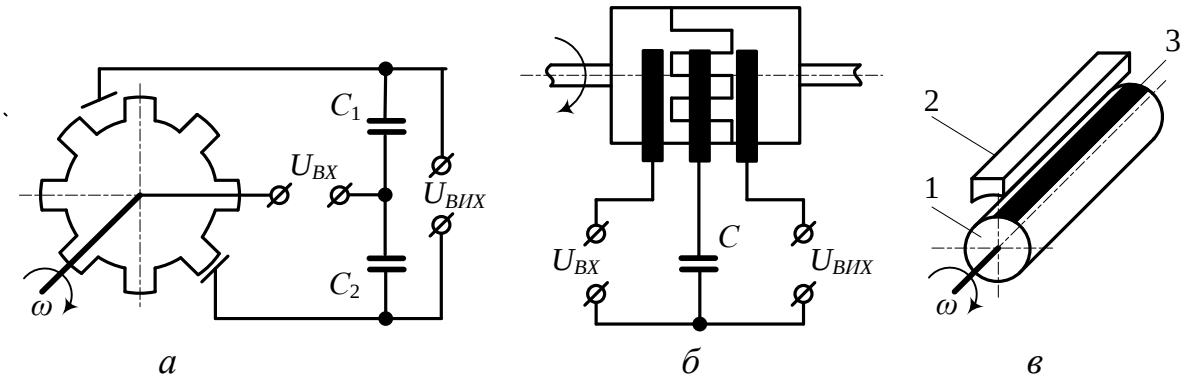


Рис. 2.55. Схема частотного індуктивного тахометра:
1 – диск із зубцями; 2 – котушки індуктивності; 3 – осердя

Ємнісні імпульсні перетворювачі. На рис. 2.56 наведено приклади безконтактного (*а*) та контактного (*б*) ємнісних перетворювачів, вихідні імпульси яких формуються в результаті почергових заряджань та розряджань одного або двох конденсаторів, тобто завдяки періодичному чередуванню процесів заряджання та розряджання конденсаторів.



а *б* *в*

Рис. 2.56. Схеми імпульсних перетворювачів ємнісних безконтактного (*а*) та контактного (*б*) й електретного (*в*):
1 – ротор; 2 – електрод; 3 – електрет

Електректні імпульсні перетворювачі. *Електретом* називають діелектрики, які мають постійну поляризацію і здатні тривалий час перебувати в наелектризованому стані (магнітний аналог - постійний магніт). Виготовлюють електрети зі смол, полімерів, воску. Ці перетворювачі мають чимало переваг перед іншими електроімпульсними приладами: малі габарити та маса, проста конструкція, не потребують зовнішніх джерел живлення, можливість використовувати як ротор вал машини чи будь-яку обертову деталь (не потребують спеціальних зубців). Електрет 3 (рис. 2.57, *в*), наклеєний на обертову деталь чи ротор 1 машини, під час їх обертання електризується внаслідок тертя об повітря.

Проходячи повз нерухомий, ізольований від корпуса електрод 2, електрет індукує на ньому заряд у вигляді імпульсу напруги, який знімається з електрода і подається на вимірювальний прилад.

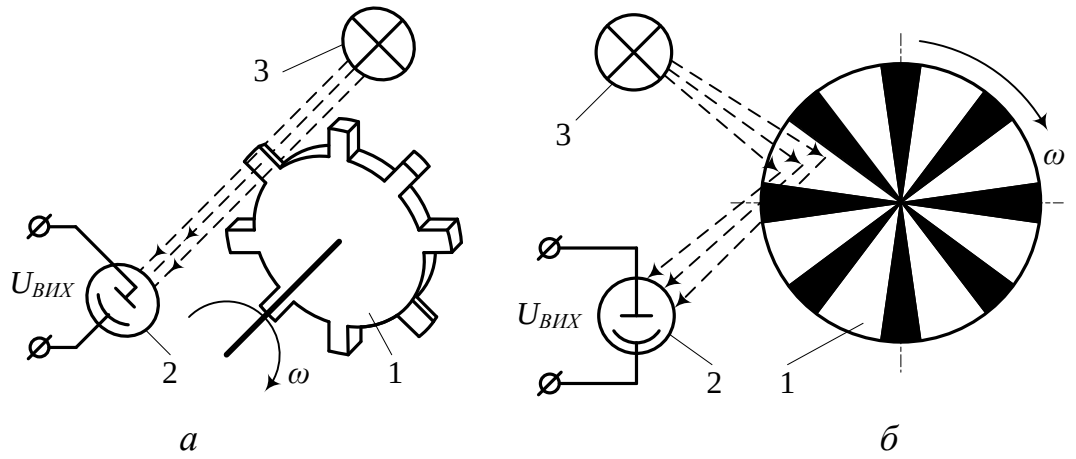
Вадою електретних перетворювачів є потреба в ретельному екрануванні перетворювача та кабеля.

Фотоелектричні імпульсні перетворювачі. Ґрунтуються на явищі фотоефекту: внутрішнього (змінюється опір напівпровідника – це фоторезистор) чи зовнішнього (змінюється емісія електронів з катода – фотодіод). Для побудови фотоелектричного перетворювача достатньо розмістити поблизу вала, швидкість якого вимірюється, джерело випромінення (освітлювач) 3 і фотоелемент 2 (приймач), а на валу закріпити диск 1 із зубцями (рис. 2.57, *а*) або нанести (фарбою чи іншим способом) мітки (рис. 2.57, *б*), коефіцієнт відбиття яких відрізнявся би від коефіцієнта відбиття диска.

Тоді частота імпульсів

$$f = mn, \qquad (2.111)$$

де m – кількість зубців (міток з різними коефіцієнтами відбиття) диска; n – кількість обертів диска.



а *б*

Рис. 2.57. Схеми фотоелектричних імпульсних перетворювачів (*а, б*):
1 – диск; 2 – фотоелемент; 3 – джерело випромінення

Фотоелектричні імпульсні перетворювачі вирізняються відсутністю гальмівного моменту, простотою конструкції, мініатюрністю.

2.9. П'єзоелектричні перетворювачі

В основу принципу дії перетворювачів покладено відкрите братами Жаком і П’єром Кюрі в 1880 р. явище прямого *п’єзоелектричного ефекту,* що полягає в появі електричних зарядів на поверхні деяких кристалів кварцу, сегнетової солі, турмаліну, титанату барію тощо; частіше використовують кварц через його малу температурну чутливість) під впливом механічних напружень, які виникають у них під дією прикладених зусиль. Обернений ефект (якщо, наприклад, до кварцової пластини підвести змінну напругу високої частоти, то вона буде здійснювати коливання відповідної частоти) називають явищем *електрострикції.*

Виходячи з фізичного принципу дії всі пьезоелектичні перетворювачі поділяються на три групи:

1. Перетворювачі, що використовують прямий п'єзоефект і застосовані в перетворювачах для вимірювання параметрів механічних процесів, в тому числі: сили, акустичного і швидкозмінних тиску, лінійних та кутових прискорень, а також вібрації, ударів.

2. Перетворювачі, що використовують зворотний пьезоеффект і застосовані як випромінювачі ультразвуку в гідроакустиці і дефектоскопії, перетворювачах напруги в переміщення (п’єзодвигунів і п’зореле) для юстування дзеркал оптичних приладів та виконавчих елементів систем автоматики.

3. Перетворювачі параметричного типу, що використовують одночасно прямий і зворотний пьезоеффекти − п'єзоелектричні резонатори, найбільш ефективно випромінюють і приймають енергію на фіксованій резонансній частоті. Пьезорезонатори застосовуються в смугових фільтрах, лініях затримки, перетворювачах переміщення або приєднаної маси в частоту для датчиків рівня, щільності та ін.

Як п'єзоелектричні використовують зазвичай природні матеріали − кварц і турмалін, а також штучно поляризовану кераміку на основі титанату барію ($BaTiO_3$), титанату свинцю ($PbTiO_3$) і цирконата свинцю ($PbZrO_3$). Можна використовувати й інші матеріали.

Кількісно пьезоефект оцінюється п'єзомодулем d, що встановлює залежність між виникаючим зарядом Q і прикладеною силою F:

$$Q = dF, \qquad (2.112)$$

де d − п'єзоелектрична постійна, Кл/Н; Q − електричний заряд, Кл/м^2; F − сила, прикладена до кристала, Н.

З п'єзоматеріалів найбільш поширений кварц, що пояснюється його задовільними п'єзоелектричними властивостями: дуже високим опором, стійкістю до дій температури і вологості, високою механічною міцністю.

Кварц має незначний коефіцієнт лінійного розширення, його п'єзомодуль, рівний $2{,}3\cdot10^{-12}$ Кл/Н, практично не залежить від температури до 200 °С, в діапазоні 200...500 °С змінюється незначно , а при 573 °С стає рівним нулю; питомий електричний опір кварцу порядку 10^{16} Ом/м; модуль пружності кварцу Е = $7{,}7\cdot10^{10}$ Па.

Всі природні п'єзоматеріали мають кристалічну структуру, яка визначає властивості п'єзоперетворювачів. Так, кварц має кристалічну структуру, в якій можна виділити шестигранну призму. По відношенню до неї в кристалі виділяють три типи осей: подовжню, або оптичну вісь Z, електричні осі X, що проходять через ребра призми кристала нормально до оптичної осі (три) і механічні, або нейтральні, осі Y, нормальні до граней кристала (їх також три).

Пьезочувствітельний елемент зазвичай вирізають з кристала кварцу у вигляді пластини (паралелепіпеда), сторони якої паралельні осям кристала (рис. 2.58, *а*).

У ненапруженому стані у пластині всі заряди скомпенсовано, і вона є електрично нейтральною (рис. 2.59, *в*). При дії сили F_X вздовж осі X на гранях S_X пластинки, перпендикулярних до осі X, виникають різнополярні електричні заряди Q_X. Це явище називається *прямим поздовжнім п'єзоефектом*.

Величина цих зарядів знаходиться в лінійній залежності від вимірюваної сили F_X:

$$Q_X = dF_X, \qquad (2.113)$$

де d – п’єзомодуль матеріалу пластинки (п'єзоелектрична постійна), Кл/Н.

При дії сили F_Y вздовж осі Y на тих самих гранях S_X пластинки виникають різнополярні електричні заряди Q'_X. Це явище називається прямим *поперечним п'єзоефектом*.

Величина цих зарядів залежить не тільки від прикладеної сили F_Y, але й від розмірів граней S_X і S_Y:

$$Q'_X = -d\frac{S_X}{S_Y}F_Y, \qquad (2.114)$$

де S_X , S_Y − площі граней пластинки, перпендикулярні до осей X, Y.

Залежно від напрямку дії сили F (стиснення або розтягування) знаки зарядів на гранях пластини будуть змінюватися. При додатку сили F уздовж осі Z пьезоефект не спостерігається. Пластина кварцу залишається також електрично нейтральною при рівномірному впливі на неї з усіх боків (наприклад, при гідростатичному стисканні).

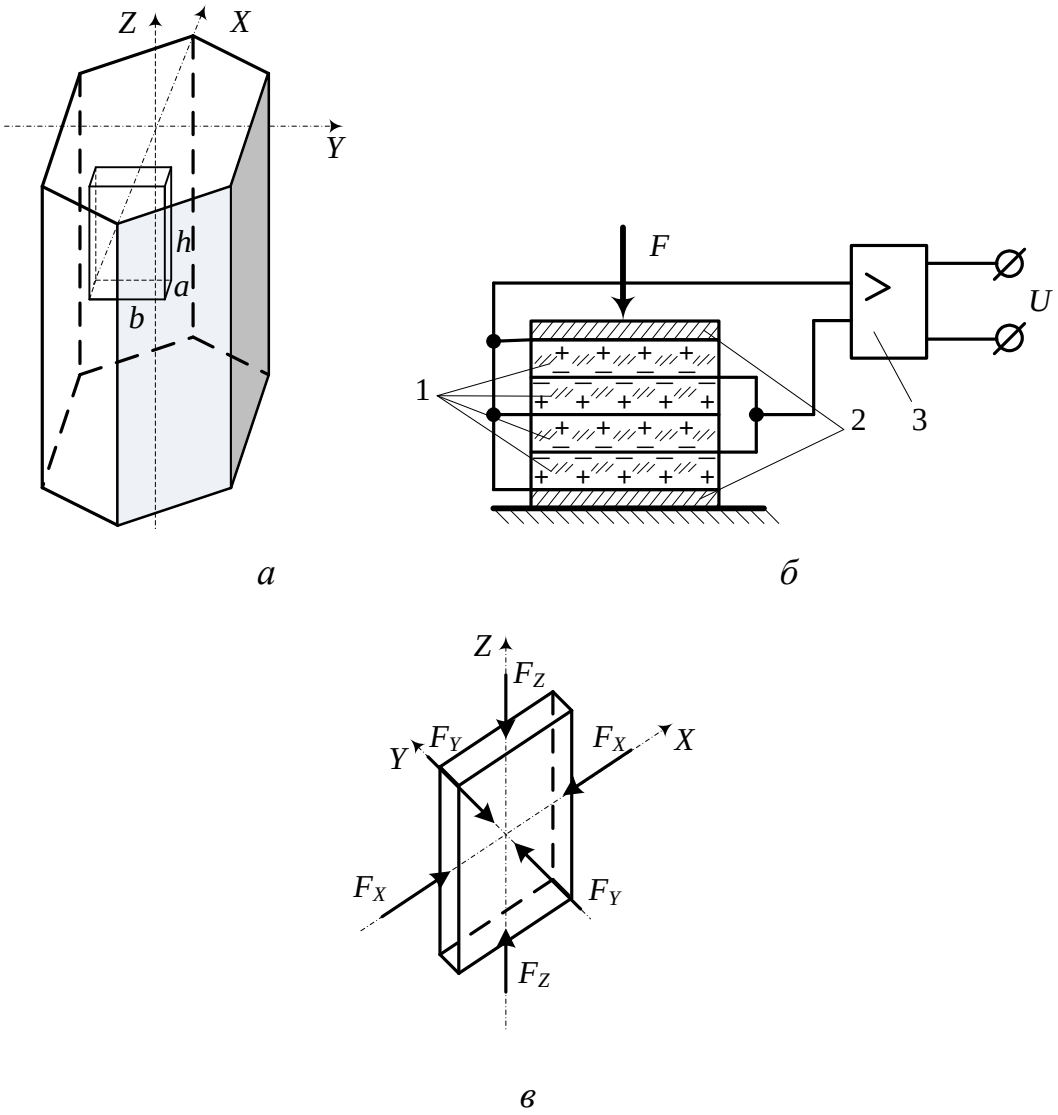


Рис. 2.58. П'єзоелектричний перетворювач:

а − п'єзочутливий елемент; *б* − п'єзоелектричний перетворювач зусилля; *в* − п’єзопластина; 1 − п’єзопластини; 2 − ізолятори; 3 − підсилювач

Турмалин (на відміну від кварцу) має не дві, а одну п'єзочутливу площину, перпендикулярну до оптичної осі Z. Завдяки цій особливості турмалин можна застосовувати для вимірювання всебічного тиску, що робить його незамінним при вимірі тиску рідин.

П'єзоелектричний перетворювач тиску являє собою пластину з п'єзоматеріалу. На дві її межі нанесені електроди, з яких знімається заряд або напруга. Напруга на обкладках при відсутності навантаження визначається за рівнянням:

$$U_0 = Q/C_П, \qquad (2.115)$$

де $C_П$ − ємність п'єзоелектричного елемента перетворювача, $C_П = \varepsilon S_X / a$; ε − діелектрична постійна матеріалу пластини; $S_X = hb$ − площа грані, перпендикулярної до осі X; a − товщина пластини.

Для збільшення сигналу, що надходить з перетворювача, часто пластини-шайби з п'єзокераміки компонують в стовпчик (рис. 2.58).

Поряд з перетворювачами, в яких п'єзоелемент працює на стиск-розтяг, застосовуються конструкції, у яких елемент працює на вигин і зрушення (рис. 2.58). Перетворювач, що працює на вигин , являє собою дві однакові пластини , склеєні між собою. Між ними розташовується металева фольга. При вигині такого елемента одна пластина подовжується , а інша коротшає . Залежно від схеми підключення обкладок можна отримати або суму напруг (див. рис. 2.59, *а*), або суму зарядів (див. рис. 2.59, *б*). Перетворювачі , що працюють на вигин, більш чутливі в порівнянні з перетворювачами, що працюють на стиск. У той же час вони поступаються останнім по міцності і діапазону частот.

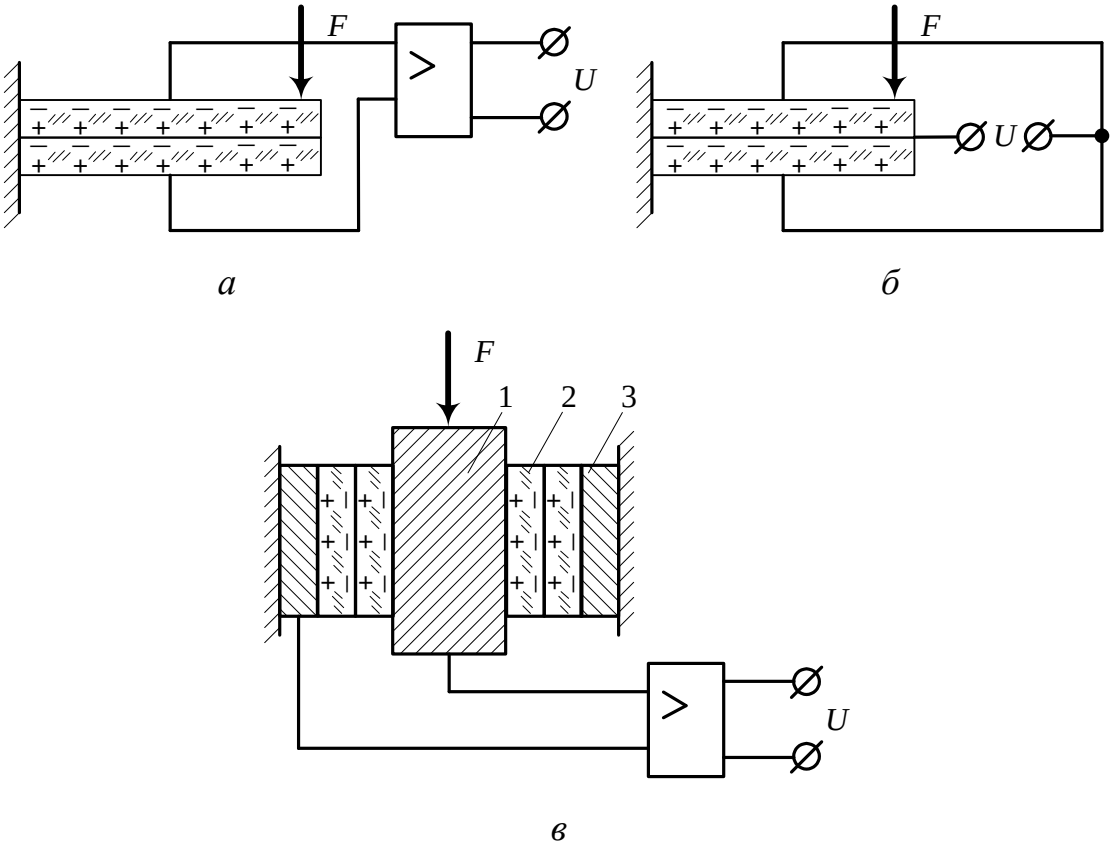


Рис. 2.59. П'єзоелектричні перетворювачі:

а, б − що працюють на вигин відповідно з сумою напруг і сумою зарядів; *в* − що працює на зрушення; 1 − кільце; 2 − зовнішній електрод; 3 − внутрішній електрод

Перетворювач, що працює на зсув, являє собою кільце з кераміки 1 (див. рис. 2.59, *в*), в яке вклеєна внутрішній електрод 3 і яке саме вклеєно в зовнішній електрод 2. Під дією сили F відбувається деформація зсуву пло-

щин, паралельних напрямку поляризації. Перевагою такого перетворювача є відсутність зарядів на електродах при бічних впливах на датчик.

До переваг п'єзоелектричних перетворювачів необхідно віднести можливість застосування для вимірювання найбільших тисків і зусиль, широкий температурний діапазон, мінімальні пружні деформації, простоту конструкції, малі розміри і вартість, високу надійність, можливість вимірювання швидкозмінних величин, до недоліків − невисоку чутливість , непридатність до виміру статичних величин, високий вхідний опір вимірювального ланцюга, відносно невисокий рівень вихідного сигналу, тобто необхідність проміжних підсилювачів.

2.10. Гальваномагнітні перетворювачі

Гальваномагнітні перетворювачі (ГМП) засновані на фізичних ефектах, що виникають в твердих тілах, які перебувають в магнітному полі, при русі в них заряджених частинок. Як вимірювальні перетворювачі практичне застосування отримали головним чином напівпровідникові ГМП, засновані на використанні ефектів Гауса і Хола.

Гальваномагнітні ефекти – Хола і Гауса – мають широкі можливості застосування для виявлення магнітних полів і визначення положення і переміщення об'єктів.

Ефект Гауса (магніторезистивний) виявляється в зміні електричного опору напівпровідника (НП) або металу в магнітному полі. Ефект Холу полягає у виникненні поперечної різниці потенціалів (ЕРС Холла) на бічних гранях пластини. Обидва ефекти обумовлено зміною траєкторії руху заряджених частинок в магнітному полі, виникають одночасно і зв'язані між собою так, що кожен з них призводить до ослаблення іншого. Вибираючи певним чином конструкцію і склад матеріалу перетворювача, можна підсилити один з ефектів, створюючи таким чином перетворювачі Холла або магніторезистивні перетворювачі.

Ефектом Холла називається явище, котре полягає в тому, що при пропусканні струму уподовж провідної пластинки, поміщеної перпендикулярно до ліній зовнішнього магнітного поля, виникає поперечна різниця потенціалів внаслідок взаємодії носіїв заряду з магнітним полем.

Припустимо, що по провіднику, який має форму прямокутної пластини, протікає електричний струм I_x (рис. 2.60, *а*). У відсутність магнітного поля різниця потенціалів між точками *C* і *D*, що лежать на одній з еквіпотенціальних поверхонь, рівна нулю.

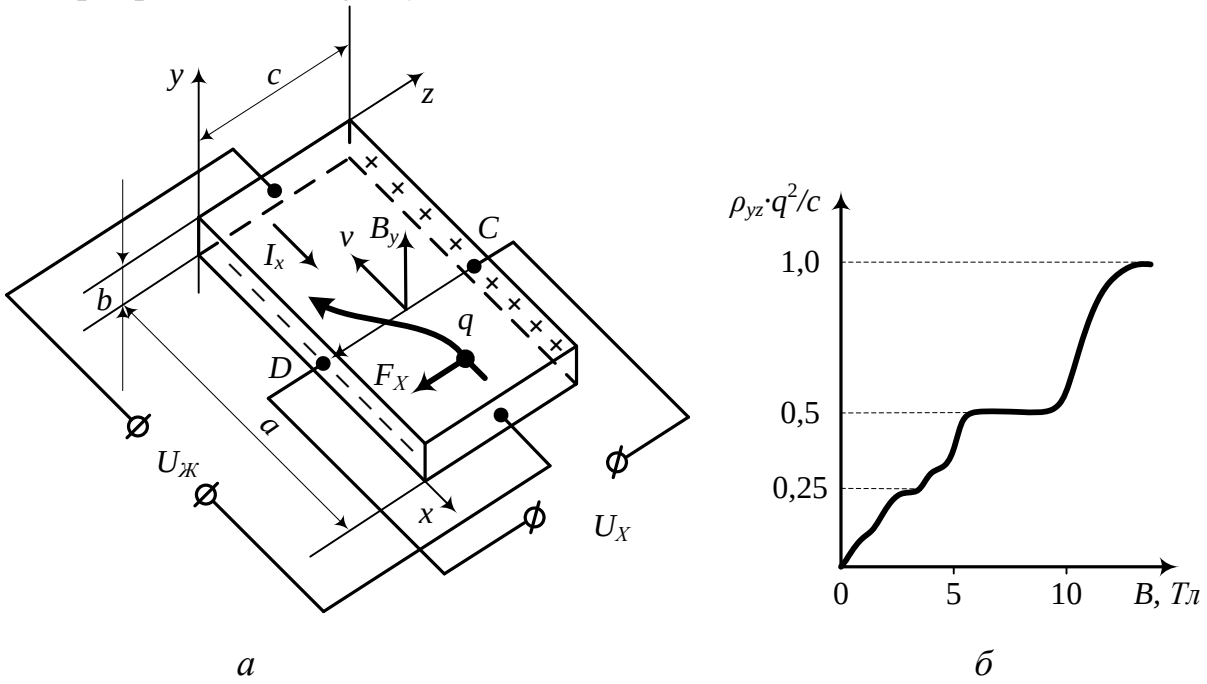
Для вимірювання ефекту Холла використовують плоскі прямокутні пластини з досліджуваної речовини (зазвичай, гетероструктурного напівпровідника), довжина *a* яких перевищує їх ширину $\boldsymbol{c}$ і товщину b. Якщо електричний струм I_x направлений уздовж пластини (уздовж осі *x*), а магнітне поле $B_{\boldsymbol{z}}$ – перпендикулярне широкій грані (уздовж осі *z*), то із-за викривлення траєкторій носіїв заряду на бічній грані пластини між точками *C* і *D* відбу-

вається їх накопичення і виникає різниця потенціалів U_x (уздовж осі y), названа холлівською ЕРС. При цьому ЕРС Холла визначається згідно виразу:

$$U_x = R_x B_z c/b = R_x B_z jc, \qquad (2.116)$$

де R_x – постійна Холла, м^3/Кл; j – густина струму у зразку; c – ширина пластини.

Величина R_x може бути знайдена з умови рівноваги носіїв заряду, визначуваного рівністю сили Лоренца і сили, що діє на рухомі носії заряду з боку холловского електричного поля. Для металів $R_x \approx 10^{-3}$ м^3/Кл, для напівпровідників $R_x \approx 10^{-3}$ м^3/Кл. Величина R в слабких магнітних полях може бути виражена через рухливість носіїв заряду μ і питому електропровідність σ: $\beta = \mu/\sigma$.



а *б*

Рис. 2.60. Давач Холла:

а – ефект Холла у плоскій пластині; *б* – крива залежності холлівського опору

Для кристалів з одним типом носіїв заряду (наприклад, легованих НП) $R_x = r/nq$, де n – концентрація носіїв заряду, q – їх заряд, r – так званий холл-чинник, залежний від механізму розсіяння носіїв заряду і напряму магнітного поля (рис. 2.60, *б*) щодо кристалографічних осей (у слабких магнітних полях r близький до 1, в сильних $r = 1$).

Пряма пропорційність між ЕРС Холла і індукцією магнітного поля (для слабких полів) дозволяє використовувати напівпровідникові зразки як давачі для вимірювання напруженості магнітного поля. Розміри таких давачів можуть бути достатньо малими (наприклад, 0,5×0,5 мм), так що з їх допомогою можна вести вимірювання з доброю просторовою роздільною здатністю.

Інерційність Холл-ефекту визначається максвеловським часом релаксації, тобто надзвичайно мала. Це дозволяє застосовувати датчики Холла для вимірювання високочастотних магнітних полів, для визначення сили струму за величиною створеного ним магнітного поля і т.п.

Як видно із співвідношення (2.116), холлівська ЕРС пропорційна створенню сили струму, який протікає через давач, на індукцію магнітного поля. Це дозволяє використовувати ефект Холла для перемножування двох сигналів, що необхідне, наприклад, у вимірниках потужності, фазових детекторах, лічильно-обчислювальних пристроях.

Останніми роками коло застосування давачів Холла дуже розширилось, охопивши багато областей радіотехніки і електроніки.

2.11. Первинні вимірювальні перетворювачі вологості

2.11.1. Загальні відомості

Вологість газів, твердих і сипких матеріалів − один з найважливіших показників технологічних процесів у агропромисловому комплексі.

Для визначення кількості вологи є дві вимірювальні величини. Вологість газів вимірюють в абсолютних або відносних одиницях.

Абсолютна вологість − це маса водяної пари, яка міститься в одиниці об'єму вологого газу. Повітря, як суміш газу і пари, завжди містить водяну пару. Водяна пара створює певний тиск, який називають тиском водяної пари. Тиск водяної пари є частиною всього барометричного тиску газу. Тиск водяної пари і відповідно абсолютна вологість повітря можуть підвищуватися при певній температурі тільки до межі насичення. Цей максимально можливий тиск називають тиском насичення. Температурна залежність тиску насичення зображується кривою тиску водяної пари.

Відносна вологість − відношення кількості водяної пари, що міститься в одному кубічному метрі газової суміші, до максимально можливої кількості пари, яка може міститись у цьому ж об'ємі суміші за такої самої температури (у відсотках).

При високій температурі повітря може поглинати більше вологи, чим при низькій. Максимальна вологість, яку може поглинути повітря, називається вологістю насичення. До насичення тиск водяної пари і отже відносна вологість пропорційна всьому барометричному тиску. Оскільки тиск насичення залежить тільки від температури, відносна вологість повітря також залежить від температури. Відносна вологість зменшується, якщо температура підвищується і навпаки. Вплив коливань температури на відносну вологість може бути значним.

Вологість газів характеризується також *вологомісткістю* − масою водяної пари, віднесеної до маси сухого тіла, а також *температурою точки роси,* тобто температурою, за якої газ насичується водяною парою, що міститься в ньому (у градусах Цельсія).

Вологість твердих і сипких тіл характеризується *вологомісткістю* - відношенням маси вологи до маси абсолютно сухого тіла.

Вологомісткість U визначають за формулою

$$U = M/M_0 = [(M_1 - M_0) / M_0] \, 100, \qquad (2.117)$$

де M − маса вологи; M_0 − маса абсолютно сухого матеріалу; M_1 − маса вологого матеріалу.

Вологість, під якою розуміють відношення маси вологи до маси вологого тіла:

$$W = M/(M + M_0), \qquad (2.118)$$

Ці величини переважно виражають у відсотках.

Іноді ці величини виражають через вагу і у відсотках. У такому випадку вирази (2.117) і (2.118) приймають вигляд:

$$U = ((P - P_0)/P_0)\cdot 100\ \%; \qquad (2.119)$$

$$W = ((P - P_0)/P)\cdot 100\ \%, \qquad (2.120)$$

где P − вага вологого тіла; P_0 − вага абсолютно сухого тіла.

Для визначення вологості в матеріалі може бути застосована будь-яка із цих величин. Перехід від однієї величини до іншої може бути здійснено за співвідношеннями:

$$U = W/(1 - W); \qquad (2.121)$$

$$W = U/(1 + U). \qquad (2.122)$$

Так, наприклад, $U = 1$ відповідає $W = 0{,}5$. На рис. 2.61 наведено залежність між U і W, яка побудована за співвідношеннями (2.117)…(2.122).

Методи вимірювання вологості. Існують прямі і непрямі методи вимірювання вологості.

Прямі методи припускають безпосередній поділ матеріалу на суху речовину і вологу, їхнє зважування і визначення вологості за (2.118).

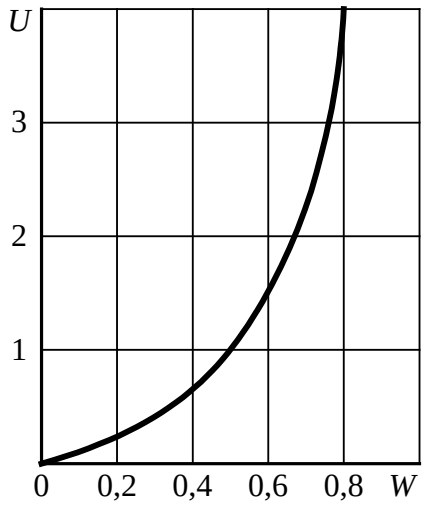


Рис. 2.61. Залежність *U* = *f*(*W*)

Зазвичай у виробничій практиці вимірюють вологість W.

Для автоматики являють інтерес непрямі методи вимірювання вологості середовищ, з яких треба виділити електричні методи і метод заміру теплопровідності.

Непрямі методи дозволяють визначити вологість за допоміжними фізичними величинами, які мають тісний кількісний зв'язок з вологістю матеріалу.

До подібних методів відносяться електричні методи, метод вимірювання теплопровідності, що залежить від вологовмісту контрольованого середовища і ін. Незважаючи на меншу точність непрямих методів у порівнянні з прямими, саме вони набули широкого застосування в системах контролю і регулювання вологи. Це обумовлено їхньою високою швидкодією і простотою передачі отриманої інформації до пристроїв керування.

Електричні первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) вологості за принципом дії розділяються на дві групи залежно від вимірюваної електричної характеристики матеріалу: *електрофізичні та електропараметричні.*

Група електрофізичних первинних вимірювальних перетворювачів вологості поєднує радіаційні і магніто-ядерні резонансні ПВП. Робота радіаційних ПВП основана на вимірюванні ступеня поглинання вологою інфрачервоного випромінювання, електромагнітних коливань високої частоти − променів і нейтронних випромінювань.

Робота магніто-ядерних резонансних ПВП основана на вимірюванні

ступеня поглинання радіочастотного магнітного поля ядрами атомів водню і вологи.

До електропараметричних ПВП вологості відносяться:

кондуктометричні ПВП, що оцінюють вологість за результатами вимірювання електричної провідності;

діелькометричні ПВП, що визначають вологість середовища за значенням її діелектричної проникності;

гігрометричні ПВП, які оцінюють вологість за виміряними електричними чи механічними характеристиками допоміжної гігроскопічної речовини.

2.11.2. Кондуктометричні первинні вимірювальні перетворювачі вологості

Принцип дії кондуктометричних (резистивних) вологомірів оснований на залежності електричного опору вологого матеріалу від вологовмісту. Сухі обезводнені сільськогосподарські матеріали мають високий питомий опір (10^{15} Ом·см і вище) У результаті зволоження через сильні дисоціюючи впливи води величина питомого опору знижується на кілька порядків. При цьому нижня межа вимірювання вологості складє 10 %, а верхня – не більше 25 %. Це обумовлено в основному різкою втратою чутливості і ростом похибок вимірювань. Поряд з вологістю на величину електричного опору сильно впливає хімічний склад матеріалу, сорт зерна і район вирощування, грунтово-кліматичні умови зони. На точність вимірювання впливають також температура матеріалу, його густина і розподіл вологості за об'ємом проби. При ретельному готуванні проби, стабілізації її температури і густини для вузького класу матеріалів цей метод можна використовувати для побудови дискретних дешевих вологомірів. Такі прилади випускаються деякими фірмами Японії й Англії. Час вимірювання резистивними вологомірами стано-

вить 1…4 хв. Враховуюче сказане, резистивні вологоміри не можуть бути використані в неперервних системах регулювання.

На сьогоднішній день як чутливі елементи вимірювачів вологості використовуються вологосорбційні (вологонакопичуючи) плівки, електропровідність яких змінюється в залежності від вологості аналізованого середовища.

Для вимірювання відносної вологості газів за додатних температур (0...100 °С) широко використовують *психрометричний метод,* що грунтується на вимірюванні різниці температур Θ_C і Θ_M двох термоперетворювачів: сухого, розміщеного в досліджуваному газовому середовищі, та мокрого, який змочений водою і перебуває в термодинамічній рівновазі з навколишнім газовим середовищем. У цьому випадку чим менша вологість аналізованого газу, тим інтенсивніше випаровування з поверхні ЧЕ мокрого термоперетворювача і тим нижча його температура.

Під час випаровування вологи зі зволоженої поверхні мокрого термометра його температура знижується. У результаті між сухим і мокрим термометрами виникає різниця температур, яку називають *психрометричною різницею.*

Відносну вологість залежно від психрометричної різниці $(\Theta_C - \Theta_M)$ виражають залежністю

$$\varphi = [\rho_M - A(\Theta_C - \Theta_M)]/\rho_C, \qquad (2.123)$$

де ρ_M − пружність пари, яка насичує аналізоване середовище за температури Θ_M мокрого термометра; ρ_C − пружність пари, що насичує аналізоване середовище за температури Θ_C − сухого термометра; A − психрометричний коефіцієнт, який залежить від конструкції психрометра, швидкості обдування мокрого термометра газом і тиску газу.

Коефіцієнт A визначають за довідковими психрометричними таблицями, складеними для певних конструкцій психрометрів. Найбільший вплив на величину A чинить швидкість обдування мокрого термометра. Зі зростанням швидкості газового потоку значення коефіцієнта A швидко зменшується і за швидкостей понад 2,5...3 м/с залишається постійним. Тому в промислових психрометрах передбачаються пристрої, що забезпечують постійну швидкість газового потоку, що не нижча за 3...4 м/с.

В електричних психрометрах для визначення температури застосовують термоелектричні перетворювачі, напівпровідникові та металеві термоперетворювачі опору. Термоелектричні перетворювачі зазвичай виготовляють у вигляді термобатарей, поділених на дві групи, одна з яких змочується. Електрорушійна сила, вимірювана на виводах термобатарей, пропорційна психрометричній різниці температур. Для її вимірювання в електричних психрометрах використовують переважно стандартні термоперетворювачі опору. В автоматичному психрометрі (рис. 2.62) різницю температур вимірюють за допомогою терморезистивних перетворювачів − сухого $R_{T.C}$ та мокрого $R_{T.M}$, увімкнених у двомостову компенсаційну вимірювальну схему.

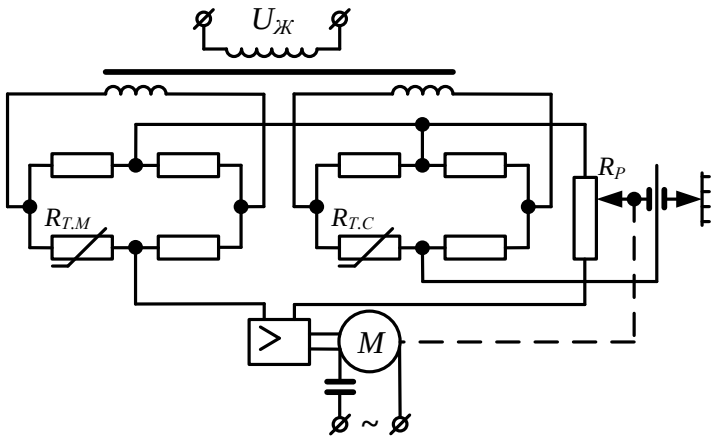


Рис. 2.62. Принципова схема двомостового компенсаційного Психрометра

Напруга розбалансу кожного з мостів буде пропорційною відповідно температурі Θ_C і Θ_M**,** а різниця цих напруг − мірою вимірюваної вологості. А оскільки напруга розбалансування двомостового кола автоматично зрівноважується спадом напруги на реохорді R_P, то переміщення повзунка реохорда і відповідно покажчика відлікового пристрою можуть бути також мірою вимірювальної вологості, а шкала − проградуйованою в одиницях вимірюваної величини.

Переваги психрометричного методу вимірювання вологості − порівняно висока точність, висока чутливість за температури понад 0 °С; недоліки − зменшення точності та чутливості за низьких температур, нестабільність функції перетворення (психрометричної сталої), зумовлена впливом зовнішніх чинників.

2.11.3. Діелькометричні первинні вимірювальні перетворювачі вологості

Діелькометричний* (*ємнісний*) *метод грунтується на залежності діелектричних властивостей матеріалу від вологості. Оскільки для сухих речовин діелектрична проникність ε = 2,0...5,0, а для води ε_B =81,0, то невелика зміна вологості матеріалу призводить до значної зміни результуючої діелектричної проникності. Як вимірювальні кола в ємнісних вологомірах найчастіше використовують трансформаторні мости з тісним індуктивним зв'язком плечей, а також резонансні вимірювальні кола.

Для живлення таких датчиків використовується діапазон радіочастот від 1 до 30 МГц. Температура і густина контрольованих матеріалів є вирішальними факторами, які необхідно враховувати чи компенсувати для підвищення точності вимірювання вологості. Поправки за температурою вносяться автоматично чи вручну. Вплив густини (природної ваги для зернових культур) компенсується спеціальними пристроями з електричними ваговимірювальними датчиками.

2.11.4. Гігрометричні первинні вимірювальні перетворювачі вологості

Найбільшого поширення набули деформаційні (механічні) і електричні (ємкісні, резистивні) гігрометри.

Деформаційні (механічні) гігрометри – це волосяні гігрометри, гігрометри на основі бруска канадської сосни, капрону, віскозної нитки і ін. матеріалів, які можуть подовжуватися до 2,5 % при зміні відносній вологості від 0 до 100 %. Вони прості за конструкцією, проте стають інерційними з пониженням температури і при десорбції чутливого елементу. Погрішність таких перетворювачів складає ±3…5 %.

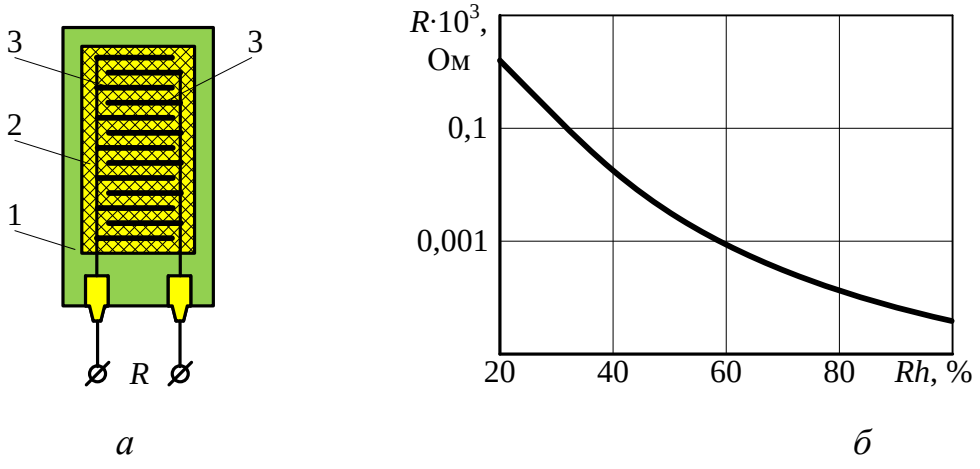
Електричні гігрометри використовують залежність електричних властивостей (ємкість, опір) чутливих елементів від вологості. Ці гігрометри діляться на тих, що підігріваються і не підігріваються.

Сорбційний хлористо-літієвий перетворювач вологості (гигрістор) перетворить зміну вологості в зміну опору. Зовнішній вигляд гигрістора і його функція перетворення показані на рис. 2.63.

Типовий гигрістор складається з підкладки 1, на яку методом трафаретного друку нанесено два зустрічно-штирьові електроди 3, покриті гігроскопічним електропровідним напівпровідниковим гелем (рис. 2.63, *а*).

Гель, як правило, складається з гідроксиетилцелюлози, нонилфенилполіетиленгликольефіру і інших органічних речовин з не менш екзотичними назвами з додаваннями вуглецевого порошку. Цей гель ретельно перемішується до утворення однорідної маси.

Інший тип гигрісторів виготовляється з плівки хлориду літію (LiCl) і речовини, що пов'язує. Підкладка занурюється в гель з контрольованою швидкістю до тих пір, поки не заповнить весь простір між електродами. Підкладка з нанесеним покриттям піддається термовідтвердженню, що проводиться при певній температурі і вологості.



а *б*

Рис. 2.63. Сорбційний хлористо-літієвий перетворювач вологості:
а – принципова електрична схема: 1 – підкладка; 2 – волого чутливий елемент; 3 – електроди; *б* – функція перетворення

Залежність опору гигрістора від вологості має нелінійний характер (рис. 2.63, *б*).

На рис. 2.64 зображена принципова електрична схема сорбційного хлористо-літієвого перетворювача вологості з підігрівом.

Сорбція (від лат. sorbeo – поглинаю) – поглинання твердим тілом або рідиною (сорбентом) рідкої речовини або газу (сорбату) з навколишнього середовища.

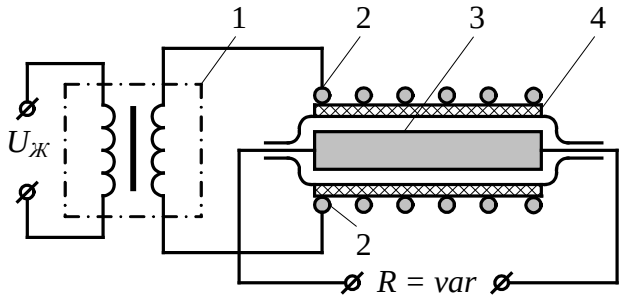


Рис. 2.64. Сорбційний хлористо-літієвий перетворювач вологості з підігрівом:

1 – джерело змінної напруги; 2 – електроди; 3 – терморезистор опору; 4 – вологочутливий елемент (корпус)

Він являє собою корпус 4 із стекловолокна, просоченого хлористо-літієвим розчином LiCl, усередині якого встановлений терморезистор 3. Корпус 4 є вологочутливим елементом. Зовні вологочутливого елементу рівномірними вітками намотані два платинових чи сріблих підігрівних електрода 2. Електроди підключені до джерела змінної напруги 1.

В результаті поглинання молекул води гідратом хлориду літию утворюється електроліт, який здатний проводити електричний струм. При поглинанні хлористим літієм водяної пари, яка міститься в атмосфері, провідність електроліту між витками спіралі збільшується. Між електродами починає текти струм, що веде до нагрівання вологочутливого елементу перетворювача. Волога, що накопичена в чутливому елементі, випаровується, а розчин кристалізується і стає неелектропровідним.

Як наслідок, зростає опір, зменшуються струм і температура датчика. Температура чутливого елементу знижується доти, пока електропровідність солі в результаті поглинання вологи не відновиться. В усталеному режимі роботи перетворювача має місце рівність вологи, що випаровується і вологи, що поглинається з повітря. Це відповідає певній температурі чутливого елементу, яка фіксується терморезистором. При цьому за температурою терморезистора визначається вологість повітря. По суті, такий метод вимірювання вологи є різновидом методу точки роси і дозволяє вимірювати вологість з точністю ±2 %.

Сорбційно-ємкісний давач вологості газів (рис. 2.65), принцип дії якого заснований на пропорційній залежності ємкості від вологості вимірюваного середовища. Він відрізняється тим, що один з його електродів має додаткові

прямокутні пази, в які укладається другий електрод з дроту, обмотаний шовковою ізоляцією. Це дозволяє втричі збільшити значення просторової характеристики поля основного зазору і, отже, збільшити початкову ємкість датчика.

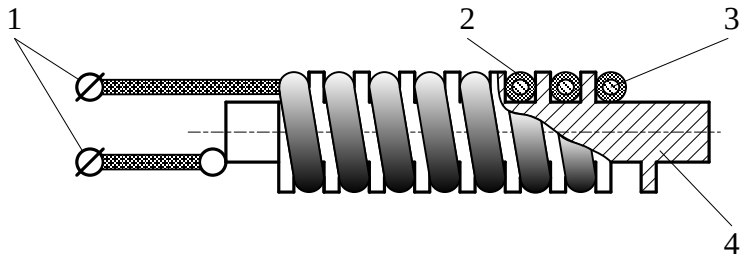


Рис. 2.65. Сорбційно-ємкісний датчик вологості газів:
1 – клеми; 2 – шовкова ізоляція; 3, 4 – електроди

Принцип роботи датчика такий. Контрольований газ під час руху проникає між електродами в мікропори діелектричного сорбенту з шовку. При зміні вологості газу змінюється рівноважна вологість шовку, а отже, і його діелектрична проникність. Це викликає пропорційну зміну ємкості давача.

2.12. Електросилові перетворювачі

Електросилові перетворювачі призначені для перетворення зусиль чутливих елементів в уніфікований сигнал постійного струму (0…5 мА) із подальшою передачею його на відстань до 1 км.

Принцип дії перетворювача (рис. 2.66) ґрунтується на методі силової компенсації зусилля чутливого елемента $P_{ЧЕ}$, який перебуває під дією вимірюваної величини $П_x$, зусиллям зворотного зв'язку $P_{ЗЗ}$ перетворювача. Вимірюваний параметр діє на чутливий елемент 10 (наприклад, мембрану, трубчасту пружину) і перетворюється у пропорціональне зусилля $P_{ЧЕ}$, яке передається на *Т*-подібний важіль 1.

Важіль 1 через рухому опору 3 діє на важіль 4, який переміщує металеву пластинку 5 індикатора непогодження 6 диференціально-трансформаторної системи. Сигнал індикатора залежить від переміщення пластини 5 і подається на підсилювач 7, який перетворює його в уніфіковані струмові сигнали 0…5 мА; 0…20 мА; 4…20 мА. Вихідний струмовий сигнал проходить через обмотку 8 магнітної системи зворотного зв'язку 9, де формується компенсуюче зусилля зворотного зв'язку $P_{ЗЗ}$, і подається на вторинний прилад ВП.

На заданий діапазон вимірювання перетворювач настроюється за допомогою рухомої опори 3, змінюючи тим самим коефіцієнт підсилення. Настроювання нуля перетворювача здійснюється пружиною 2. У зрівноваженому стані системи у точці дотику опори 3 з важелем 1 зрівноважуються зусилля чутливого елемента та пристрою зворотного зв'язку. Класи точності електросилових перетворювачів − 0,6; 1,0.

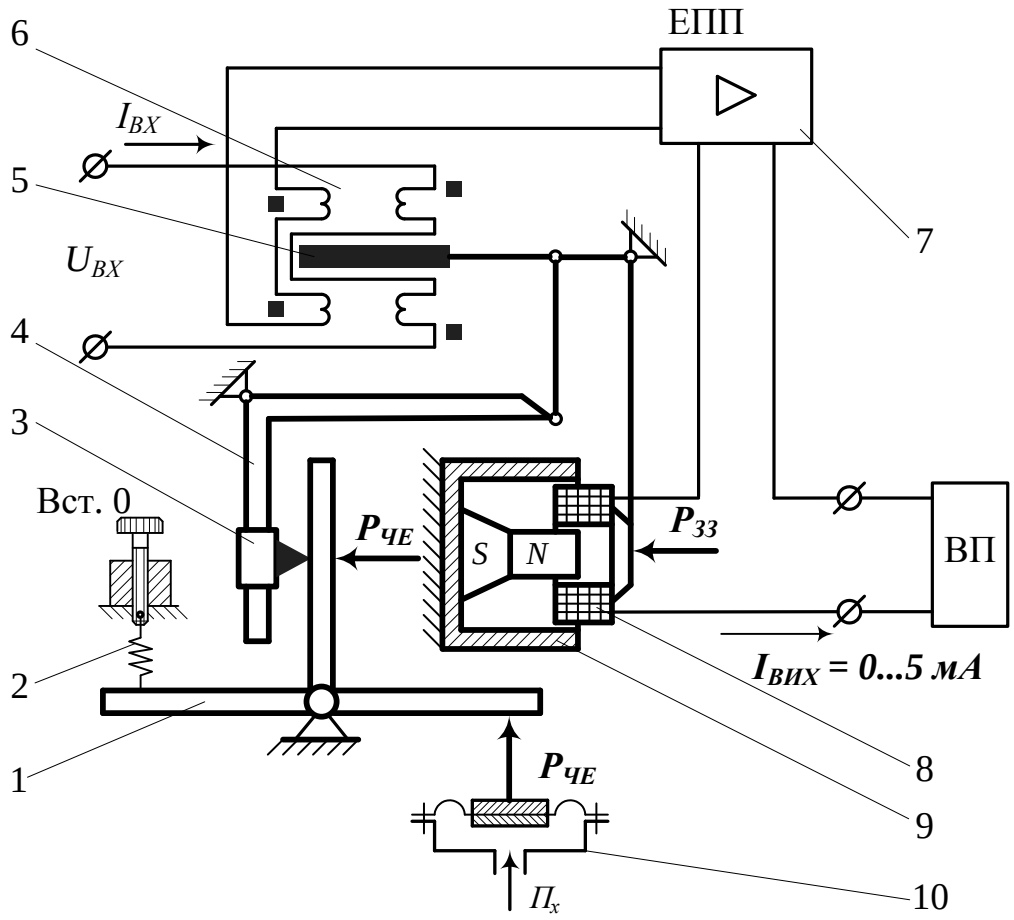


Рис. 2.66. Принципова схема електросилового перетворювача:
1, 4 − важіль; 2 − пружина; 3 − опора; 5 − металева пластинка; 6 − індикатор непогодження; 7 − пілсилювач; 8 − обмотка; 9 − пристрій зворотного зв'язку; 10 − первинний вимірювальний перетворювач

Електросилові перетворювачі мають високу точність, широкий діапазон настроювання, проте на їх роботу негативно впливають вібрації. Як вторинні прилади використовують мілівольтметри та автоматичні потенціометри.

2.13. Пневмосилові перетворювачі

Пневмосилові перетворювачі з уніфікованим сигналом 20…100 кПа поширені у пневматичних системах вимірювання та регулювання. За основу їхньої роботи покладено метод силової компенсації зусиль чутливого елемента зусиллям зворотного зв'язку перетворювача.

Принципова схема перетворювача наведена на рис. 2.67.

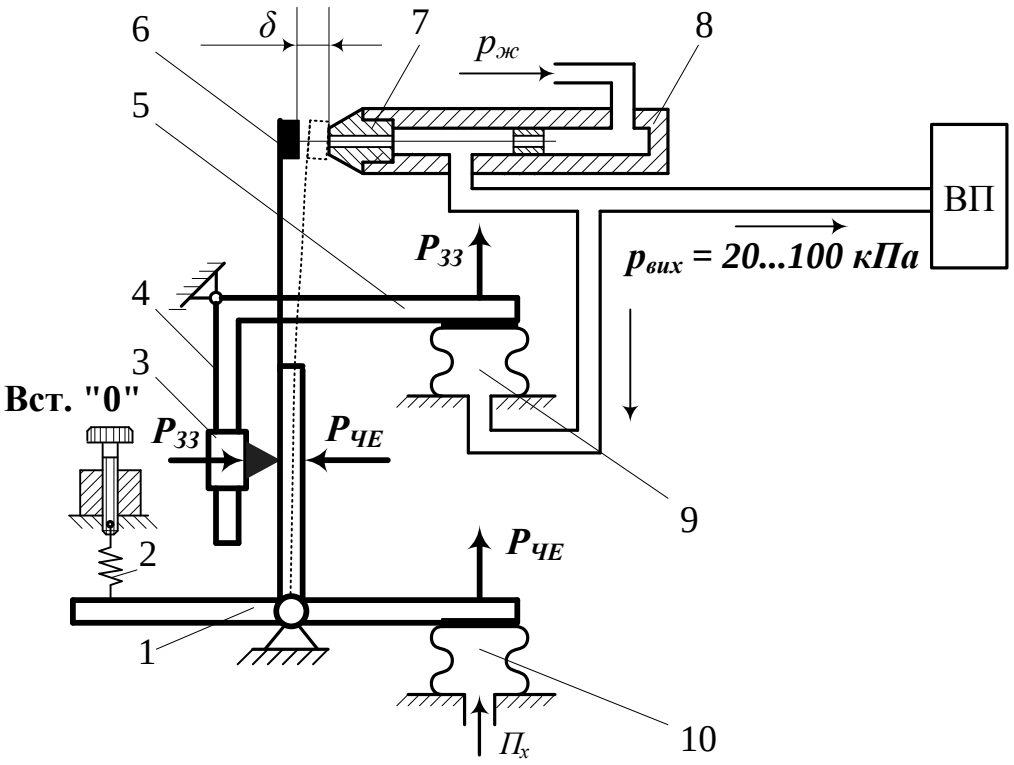


Рис. 2.67. Принципова схема пневмосилового перетворювача:
1, 4, 5 – важелі; 2 – пружина; 3 – рухома опора; 6 – заслінка;
7 – сопло; 8 – пневмопідсилювач; 9, 10 – сильфони

Вимірювана величина $П_x$, діючи на чутливий елемент 9, перетворюється на пропорціональне зусилля $P_{ЧЕ}$, яке повертає Т-подібний важіль 1 із жорстко закріпленою до нього заслінкою 6. При переміщенні останньої відносно нерухомого сопла 7 змінюється зазор між ними і відповідним чином змінюється вихідний тиск пневмопідсилювача 8 − від 20 до 100 кПа. Вихідний сигнал перетворювача подається через пневмолінію на вторинний прилад ВП і на сильфон зворотного зв'язку 9. Зусилля $P_{ЗЗ}$ через важіль 5 і рухому опору 3 зрівноважує зусилля чутливого елемента $P_{ЧЕ}$.

Настроювання діапазону вимірювання здійснюється за допомогою рухомої опори 3, а настроювання пневматичного нуля (20 кПа) − пружини 2. Класи точності перетворювачів − 0,6; 1,0. Як вторинні перетворювачі використовуються пневматичні показуючі та самописні прилади типу ППВ, ПКП, ПВ, РПВ та ін.

2.13.1. Перетворювач «лінійне переміщення - пневмосигнал»

Цей пневмоперетворювач побудовано за схемою компенсації переміщень. Він містить первинне реле, що має постійний дросель 3, сопло 1 і заслінку 2, з'єднану з ЧЕ, та підсилювач, який складається з дросельної системи і сильфонного приводу (рис. 2.68).

Дросельна система складається з послідовно розміщених сопел 4 (через нього в підсилювач надходить стиснене повітря) та 5 (через нього повітря із підсилювача стравлюється в атмосферу), між якими поміщено тарілчастий

клапан 9. Привід підсилювача являє собою концентрично розміщені один в одному сильфони 10 і 11, які поміщено всередину камери 7 підсилювача. Тарілчастий клапан 9 жорстко з'єднано з рухомою торцевою стінкою сильфонів штоком. На сильфонний привід підсилювача діють дві взаємно протилежні сили, зумовлені тисками P_1 і $P_{вих}$. У зрівноваженому стані $P_1F = P_{вих} f$, де F і f- ефективні площі сильфонів 10 і 11 відповідно. Звідси $P_{вих} / P_1 = F / f = k$. З конструктивних міркувань відношення F / f, яке називають коефіцієнтом підсилення тиску, зазвичай беруть рівним 4.

Перетворювач працює таким чином. Зі збільшенням вимірюваного параметра $П_x$ (наприклад, тиск або будь-який інший параметр - рівень, температура, перепад - у вигляді тиску) важіль 16 зміщується праворуч, а заслінка 2, переміщуючись ліворуч, прикриває сопло *1*. При цьому тиск P_1 над сильфонами збільшується, сильфони 10 і 11 стискаються, тарілчастий клапан 9, стискаючи пружину 6, переміщується вниз, відкриваючи отвір сопла *4*. У результаті тиск $P_{вих}$ у камері 7 збільшується, досягаючи максимального значення за повного закриття сопла 5.

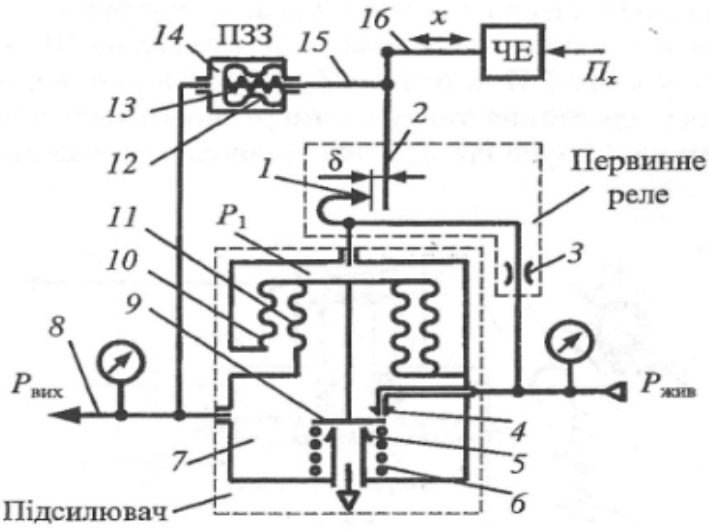


Рис. 2.68. Схема пневмоперетворювач типу «лінійне переміщення - пневмосигнал»:

1 – сопло; 2 – заслінка; 3 – пневмодросель; 4,5 – сопла; 6, 13 – пружини; 7,14 – камери;8 – трубка; 9 – тарілчастий клапан; 10,11,12 – сильфони; 15 – шток; 16 – важіль

Пропорційність залежності $P_{вих} = f(П_x)$ і недопущення повного закриття сопла 5 (або, навпаки, зі зменшенням $П_x$ - повного закриття сопла 4 і обнуління вихідного сигналу) забезпечується ПЗЗ. Так, зі збільшенням тиску $P_{вих}$ у камері 14 стискається сильфон 12, який через шток 15 відводить заслінку 2 від сопла 1, перешкоджаючи повному його закриттю.

2.13.2. Перетворювач «кутове переміщення - пневмосигнал»

Схему будови пневматичного передавального перетворювача типу ПП, що використовується як додатковий пристрій у первинних перетворювачах, а

також у вторинних приладах типу КСП-3, КСМ-3 та ін., оснащених убудованими пневматичними пропорційно-інтегральними регулювальними пристроями, показано на рис. 2.69.

Вихідний пневмосигнал $P_{вих}$ формується у камері II, у яку повітря надходить із камери I через пластинчастий клапан 4, сполучений із мембранним блоком 8 порожнистим штоком 6. У положенні, показаному на рис. 2.69, пластинчастий клапан 4 закрито зусиллям пружини 5, а камера П через порожнистий шток 6 і камеру ПІ сполучена з атмосферою. У цьому разі вхідне зусилля q мале, тому відповідно невеликий і тиск у камері IV, і опір на виході сопла 12. При цьому зусилля, що діє на мембранний блок 8 з боку камери IV, менше, ніж зусилля, створюване пружиною 7.

Зі зростанням зусилля q на важелі 13 пропорційно куту повороту вхідної осі 1 зазор 5 зменшується, і водночас збільшується опір на виході із сопла 12. Це зумовлює відповідне збільшення тиску в камері IV і як результат цього - переміщення порожнистого штока 6 уверх.

Шток 6 піднімає пластинчастий клапан 4, відкриваючи його і одночасно перекриваючи сполучення камери II з камерою III (атмосфера). У результаті тиск у камері II, а отже, і $P_{вих}$ будуть відповідно збільшуватись. Це викликає зростання тиску в камері зворотного зв'язку V і створеного мембраною 11 зусилля $q_{З.З}$, яке зрівноважує зусилля q за нового значення зазору δ.

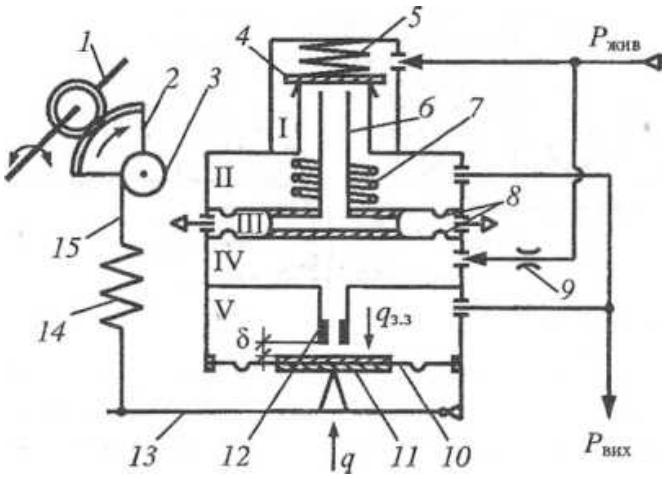


Рис. 2.69. Схема пневмоперетворювача типу «кутове переміщення - пневмосигнал»:

1,2,3 – кінематичний механізм (поворотом вхідної осі 1 створює натяг пружини 14);4 – пластинчастий клапан; 5, 7,14 – пружини;6 – порожнистий шток;8 – мембранний блок; 9 – постійний пневмодросель; 10 – мембрана; 11 – заслінка;12 – сопло зворотного зв'язку; 13 – важіль з упором; 15 – трос

Автоматичне підтримання вихідного тиску $P_{вих}$ здійснюється за динамічної рівноваги мембранного блока: порожнистий шток 6 і пластинчатий клапан 4 перебувають у режимі незагасальних високочастотних коливань.

2.14. Перехідні (узгоджувальні) перетворювачі

2.14.1. Електропневматичні і пневмоелектричні перетворювачі

У більшості сучасних систем автоматичного управління виробничими процесами використовуються засоби вимірювань з різними вихідними і вхідними сигналами, наприклад, пневматичними, електричними, гідравлічними і ін. Для обміну інформацією в подібних системах широко застосовуються перетворювачі пневматичних сигналів в електричних (ПЕП) і електричних сигналів в пневматичних (ЕПП).

Електропневматичні перетворювачі. Електропневматичні перетворювачі необхідні в тих випадках, коли в пневматичну систему управління потрібно ввести інформацію про технологічні параметри, що поступає від вимірювальних перетворювачів з уніфікованим струмовим сигналом, а також коли автоматична система управління електрична, а її командний сигнал посилається на пневматичний виконавчий механізм.

Електропневматичні перетворювачі (рис. 2.70) − вимірювальні перетворювачі, призначені для перетворення безперервного уніфікованого сигналу постійного струму (0…5 мА) в уніфікований пропорційний пневматичний аналоговий сигнал (20…100 кПа).

Принцип роботи ґрунтується на пневмосиловий компенсації змінного

струмового вхідного сигналу. При проходженні вхідного струму I_{BX} через

обмотку 7 електромагніта 8 виникає тягове зусилля P_1, яке переміщує важіль 3. При цьому змінюється відстань δ між заслінкою 6 і соплом 5, що викликає зміну тиску в лінії сопла, який надходить на пневмопідсилювач 9. Одночасно зі зміною пневматичного сигналу на виході підсилювача тиск подається на сильфон зворотного негативного зв'язку 4. Зусилля сильфона $P_{ЗЗ}$ спрямоване зустрічно тяговому зусиллю P_1 електромагніта 8. Тиск на виході змінюватиметься до повного урівноваження моментів обох зусиль $P_1 \cdot АО = P_{ЗЗ} \cdot ВО$, а вихідний пневмосигнал стане пропорційним вхідному струмовому сигналові.

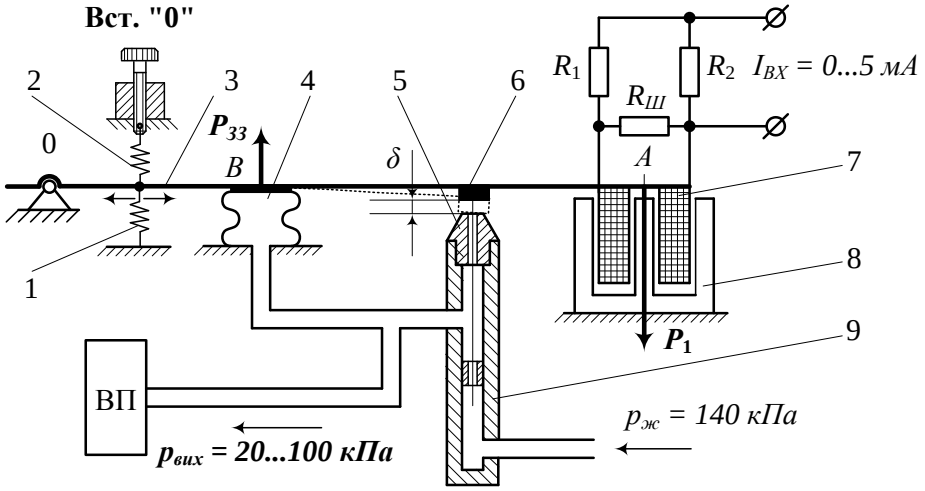


Рис. 2.70. Принципова схема електропневматичного перетворювача:
1, 2 – пружина; 3 – важіль; 4 – сильфон; 5 – сопло; 6 – заслінка;
7 – обмотка; 8 – електромагніт; 9 – пневмопідсилювач

Пружина 1 призначена для гасіння автоколивань важільної системи перетворювача, а зі зміщенням її на важелі 3 змінюється коефіцієнт пропорційності. Пружиною 2 встановлюється початок діапазону перетворення (20 кПа) при початковому значенні вхідного струмового сигналу, що дорівнює 0. Промислові електропневмоперетворювачі типу ЕПП мають класи точності: 0,6; 1,0.

Пневмоелектричні перетворювачі. Пневмоелектричні перетворювачі (рис. 2.71) − вимірювальні перетворювачі, призначені для перетворення безперервного уніфікованого пневматичного сигналу (20…100 кПа) в безперервний уніфікований сигнал постійного струму (0…5 мА).

Принцип їх роботи ґрунтується на електросиловій компенсації змінного пневматичного вхідного сигналу. При зміні вхідного тиску $p_{вх}$, який підводиться до трубчастої пружини 1, вільний її кінець переміщується і завдяки пружині 8 переміщує важіль 3 із зусиллям P_1.

На протилежному кінці важіля 3 розташована алюмінієва пластина 4,за допомогою якої змінюється частота коливального *LC*-контура перетворювача. Електронний підсилювач 5 перетворює зміну частоти у струмовий вихідний сигнал $I_{ВИХ}$, який, проходячи через обмотку 6 електромагніта 7 зворотного негативного зв'язку, утворює зусилля зворотного зв'язку $P_{ЗЗ}$.

При зрівноваженні механічного й електричного моментів P_1 АО = $P_{ЗЗ}$ ВО на виході перетворювача формується вихідний струмовий сигнал, пропорційний вхідному пневматичному сигналові. При цьому механічне зусилля P_1 трубчастої пружини зрівноважується зусиллям P_2 електромагніта зворотного зв'язку.

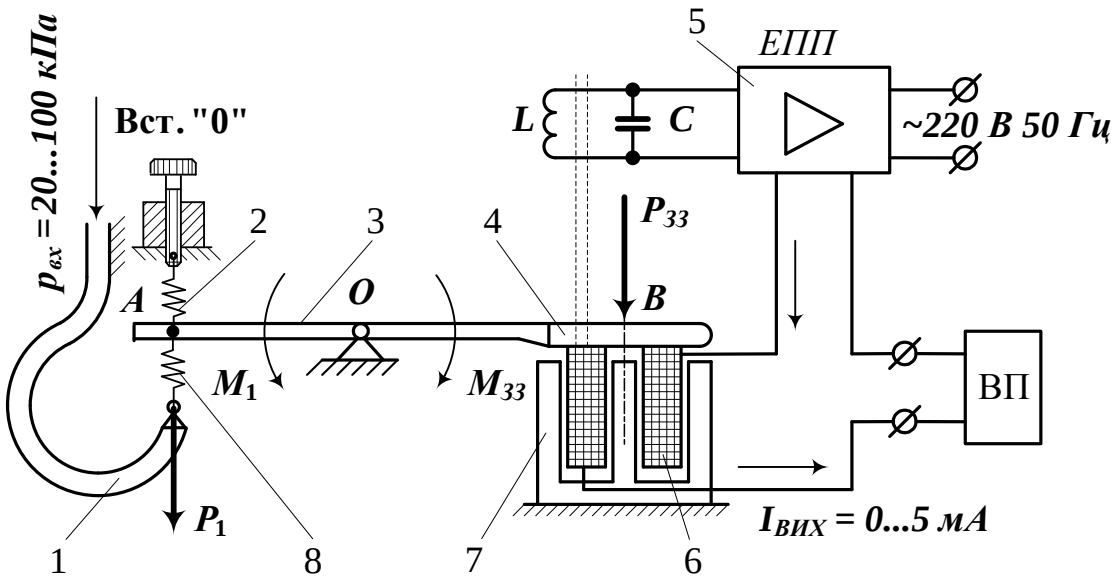


Рис. 2.71. Принципова схема пневмосилового перетворювача:
1 – трубчаста пружина; 2, 8 – пружини; 3 – важіль; 4 – алюмінієва пластина; 5 – підсилювач; 6 – обмотка; 7 – електромагніт

Пружиною 2 встановлюється початок діапазону перетворень вхідного тиску, що дорівнює 20 кПа. Пневмоелектроперетворювачі типу ПЕ випускаються з такими класами точності: 0,6 і 1,0.

Крім наведених перетворювачів сигналів, йде промислове освоєння випуску нових перетворювачів, що базуються на нових принципах і методах вимірювання та мають вищі класи точності.

2.14.2 Аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі

Усі вимірювальні перетворювачі, посутньо, аналогові, а їхні сигнали, що несуть повну інформацію про досліджуваний процес, дуже швидко обробляються й передаються лініями зв'язку, позаяк всі операції з аналоговими сигналами виконуються на кілька порядків швидше, ніж із даними в цифровій формі. Похибки та спотворення аналогових сигналів у процесі їх оброблення та невисока завадостійкість обмежують їх застосування в автоматизованих системах. Однак як у системах контролю та керування, так і всередині технічних засобів, які входять до їх складу, використовуються обидва види сигналів, тому виникає потреба в забезпеченні переходів від аналогових сигналів до цифрових і навпаки. Існують різні способи здійснення такого переходу.

Аналого-цифрові перетворювачі – це вимірювальні перетворювачі, призначення яких полягає в автоматичному перетворенні вимірюваної аналогової величини в дискретну, подану у вигляді цифрового коду. На відміну від аналогового сигналу, що набуває будь-якого значення в певному діапазоні й заданому інтервалі часу, тобто є неперервною величиною, цифровий сигнал містить дискретні значення або фіксований крок у відповідному діапазоні. Це наслідок того, що будь-яка неперервна величина, обмежена певними граничними значеннями, може бути дискретизована за часом і квантована за рівнем. Оскільки в разі дискретизації та квантування втрачається частина інформації, то для забезпечення точного перетворення аналогового сигналу в цифровий потрібно вибрати досить велику кількість цифр у діапазоні зміни фізичної величини.

Квантовані значення в діапазоні зміни цифрової величини називаються *рівнями квантизації* й повністю залежать від кількості двійкових розрядів у цифровому слові, використовуваному для подання значення деякої величини. Наприклад, якщо мова йде про чотирирозрядне слово для цифрового подання значення, то для цього є тільки 2^4 — 1 — 15 рівнів квантизації, у загальному випадку л-розрядне слово дає 2^n - 1 рівнів у ході аналого-цифрового перетворення. Оскільки окреме цифрове слово може представляти лише одне окреме аналогове значення, то розширення кількості розрядів у слові, використовуваному в цифровій системі, збільшує роздільну здатність системи, оскільки стає більше рівнів квантизації на відрізку, що дорівнює значенню аналогового сигналу.

Існує багато способів перетворення. Відповідно до методу побудови всі АЦП можна розділити на три групи: із часоімпульсним перетворенням, із частотно-імпульсним перетворенням і порозрядного зрівноваження.

Зупинимося на першій з них, тобто на АЦП із часоімпульсним перетворенням. В основу часоімпульсного методу покладено перетворення вимірюваної величини в інтервал часу, заповнюваний потім імпульсами зі

стабільною частотою проходження (лічильними імпульсами). Аналого-цифрові перетворювачі, що використовують цей метод, застосовуються для перетворення часового інтервалу, напруги, частоти, різниці фаз й інших параметрів у код.

Спрощену функціональну схему АЦП із часоімпульсним перетворенням зображено на рис. 2.72. Вона містить у собі два перетворювачі, перший з яких перетворює вхідну величину *X* в інтервал часу Δt, другий - інтервал часу Δt у послідовність імпульсів (цифровий код) *N*.



Рис. 2.72. Функціональна схема АЦП із часоімпульсним перетворенням

Якщо структура першого перетворювача може бути різною залежно від виду вхідної величини *X*, то структура перетворювача *часовий інтервал - код* однакова для всіх АЦП. Її зображено на схемі, показаній на рис. 2.73.

Часовий інтервал $\Delta t_x = t_2 - t_1$ задається двома короткими імпульсами u_{t1} і u_{t2} - опорним (у момент часу t_1) та інтервальним (у момент часу t_2). Ці імпульси надходять на блок формування *БФ,* який виробляє прямокутний імпульс $u_{\text{пр}}$ тривалістю $\Delta t_x = t_2 - t_1$ Зазначений прямокутний імпульс подається на вхід *1* часового селектора *ЧС,* а на вхід 2 від генератора лічильних імпульсів *ГЛІ* постійно надходить послідовність лічильних імпульсів $u_л$ зі строго визначеною частотою проходження $f_л$. Лічильні імпульси можуть проходити через *ЧС* на вихід тільки тоді, коли *ЧС* відкритий прямокутним імпульсом $u_{пр}$, тобто впродовж часового інтервалу Δt_x.

Оскільки період проходження ЛІЧИЛЬНИХ Імпульсів $T_л = 1 / f_л$ вибирається набагато меншим, ніж Δt_x, то можна стверджувати, що кількість лічильних імпульсів *N*, які пройшли через *ЧС,* виражається формулою $N \approx \Delta t_x / T_л = \Delta t_x f_л$. Отже, $\Delta t_x \approx N / f_л$. Таким чином, кожному часовому інтервалові ставиться у відповідність послідовність певної кількості імпульсів на виході АЦП, тобто цифровий код.

Сумарна похибка описаного вище АЦП визначається такими основними чинниками: нестабільністю частоти проходження лічильних імпульсів, похибкою перетворення вимірюваного часового інтервалу в тривалість прямокутного імпульсу, що відкриває *ЧС,* та похибкою дискретності. Щоб практично усунути похибку, спричинену нестабільністю $f_л$, застосовують *ГЛІ* з кварцовою стабілізацією.

Друга складова похибки зумовлена впливом завад на роботу *БФ.* Основним елементом *БФ* є тригер. На момент перекидання тригера з одного стійкого стану в інший може впливати завада, яка додається до напруги, що надходить на вхід *БФ.* Тому тривалість прямокутного імпульсу, що впливає на *ЧС,* може дещо відрізнятися від часового інтервалу Δt_x Ця відмінність призводить до похибки, що має випадковий характер. Для її зменшення треба по можливості збільшувати відношення сигнал/завада на вході *БФ.*

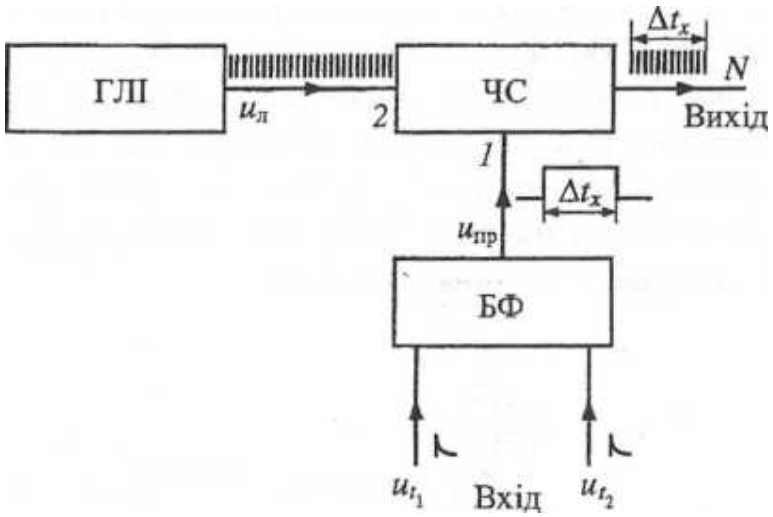


Рис. 2.73. Структурна схема перетворювача *часовий інтервал – код*

Третя складова похибки є наслідком того, що числове значення часового інтервалу Δt_x неперервної аналогової величини замінюється цілим числом періодів $T_л$. Оскільки інтервал Δt_x у загальному випадку не кратний $T_л$, то виникає похибка дискретності $\Delta_д$, абсолютне значення якої не перевищує тривалості періоду проходження лічильних імпульсів: $|\Delta_Д| < T_л$. Існують різні способи зменшення похибки дискретності. Найбільш прямий пов'язаний зі збільшенням частоти проходження лічильних імпульсів; істотному просуванню в цьому напрямі перешкоджають технічні складності створення високочастотної апаратури. Застосовується також синхронізація лічильних імпульсів з початком дискретизувального часового інтервалу; це дозволяє вдвоє зменшити значення похибки дискретності. Існують і інші способи - більш складні, але й більш ефективні.

Дуже просто й швидко виконується перетворення в паралельному (або спалаховому) АЦП, який до тогож – один із найпоширеніших. Ці елементи приладів виготовляють у формі інтегральних схем; вони вирізняються високою швидкістю перетворення. Структурну схему паралельного АЦП показано на рис. 2.74. В АЦП використовуються кілька окремих елементарних компараторів *1,* які зіставляють аналоговий сигнал з деякою кількістю опорних напруг, кожна з яких відповідає певному рівневі квантування. Залежно від розрядності *n* цифрового слова розраховують кількість напруг і відповідно компараторів: T - 1. Так, для трирозрядного цифрового слова (як це показано на рис. 2.74) має застосовуватися 2^3 - 1 = 7 опорних напруг, а отже, і сім компараторів.

Точність перетворення визначається винятково точністю опорних напруг, які створюються за допомогою ланцюжка резисторів R_h підключених до джерела загальної опорної напруги. Шифратор у паралельному АЦП використовує виходи компараторів для перетворення їх безпосередньо в цифровий двійковий вихідний сигнал.

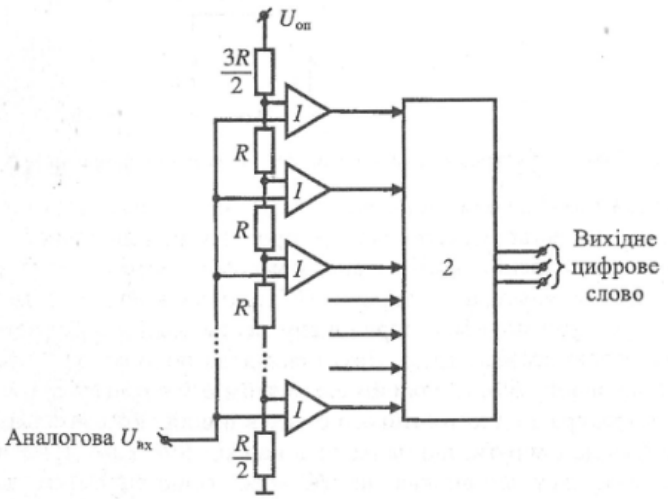


Рис. 2.74. Схема паралельного АЦП:
1 – компаратор; 2 – шифратор

У цифрових системах автоматичного керування (нерідко – й у схемах цифрових вимірювальних приладів) використовуються пристрої, що перетворюють цифровий код в аналогову величину, однорідну з вимірюваною. Такі пристрої називаються цифро-аналоговими перетворювачами (ЦАП).

Принцип дії Ц АП вагового типу ілюструє схема, показана на рис. 2.75.

Резистори R_1 R_2,. . . , R_n підбирають таким чином, щоб їх провідності співвідносилися як вагові коефіцієнти керувального двійкового коду, тобто щоб

$(1/ R_n) / (1/ R_{n-1}) = (1/ R_{n-1}) / (1/ R_{n-2}) = ... = (1/ R_1) / (1/ R_2) = 2.$

При цьому вихідна напруга буде мати значення

$$U_{вих} = AE \sum_{i=1}^{n} k_i 2^{i=1}$$

де A - коефіцієнт пропорційності; E – зразкова напруга; n – кількість розрядів керувального двійкового коду, який надходить на входи a_1 , a_2,..., a_n, i - номер розряду; k_i – розрядний коефіцієнт, що може набувати значення 0 або 1 залежно від положення ключа S_i.

У свою чергу, положення ключів керується кодовими імпульсами, що надходять на входи a_1 , a_2,..., a_n. У результаті цифровий код виявляється перетвореним у пропорційну аналогову напругу $U_{вих}$.

Зведена похибка ЦАП становить близько 0,1 %.

Для підвищення точності перетворення аналогового сигналу вимірювального пристрою в цифровий код до рівня, прийнятного для вимірювальних систем, ЦАП часто встановлюють у лінії зворотного зв’язку різних інформаційно-вимірювальних систем. При цьому в більшості випадків аналого-цифрові перетворення виконують із використанням принципу послідовного наближення: спочатку здійснюють грубе перетворення аналогового сигналу в цифровий, потім його знову перетворюють в аналоговий (цифро-аналогове

перетворення саме по собі просте) і порівнюють отримане значення з первинним. Якщо первинне значення більше від отриманого в ході подвійного перетворення аналогового сигналу, то цифрове значення збільшується, якщо менше - то зменшується. Так триває доти, доки первинне значення аналогового сигналу не збіжиться з отриманим у ході подвійного перетворення.

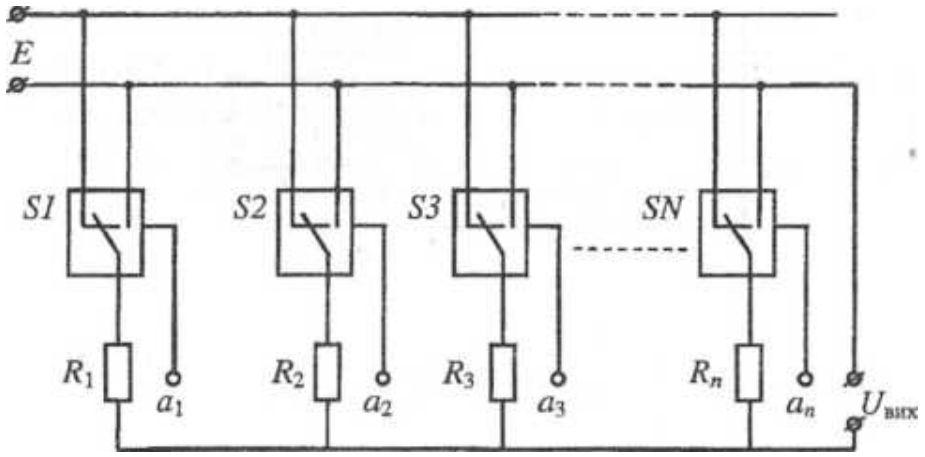


Рис. 2.75. Спрощена схема ЦАП вагового типу

Структурну схему такого АЦП показано на рис. 2.76. Сигнал від компаратора 1 прикладається до регістра 3 з керувальною логікою. У вимкненому стані регістр установлюється в нуль і на виході ЦАП напруги немає. У результаті появи будь-якої аналогової напруги $U_{\text{ВХ}}$ на вході компаратора викличе на його виході логічну одиницю.

Тактові імпульси, впливаючи на блок керувальної логіки 2, зумовлюють зміну молодшого розряду регістра 3 на одиницю, внаслідок чого сигнал на виході ЦАП збільшується. Компаратор 1 здійснює порівняння аналогових напруг на вході ($U_{\text{ВХ}}$) і на виході ЦАП (сигнал зворотного зв'язку $U_{3.3}$). Якщо напруга на вході все ще вища за напругу на виході ЦАП, то вихід компаратора залишається в стані логічної одиниці. Тоді черговий тактовий імпульс блока керувальної логіки змінює на одиницю наступний розряд регістра. У такий спосіб відбувається зміна кожного його розряду.

Коли аналогова вхідна напруга $U_{вх}$ після якого-небудь кроку стане меншою від вихідної напруги ЦАП ($U_{3.3}$), блок керувальної логіки встановлює останній розряд у нуль перш, ніж відбудеться зміна наступного розряду на одиницю, і процес порівняння продовжується. На рис. 2.76, *б* зображено відповідну описаному пристрою часову діаграму. Слід зазначити, що тривалість перетворення будь-якого вхідного аналогового сигналу в л-розрядному перетворювачі дорівнює тривалості *n* періодів тактових імпульсів.

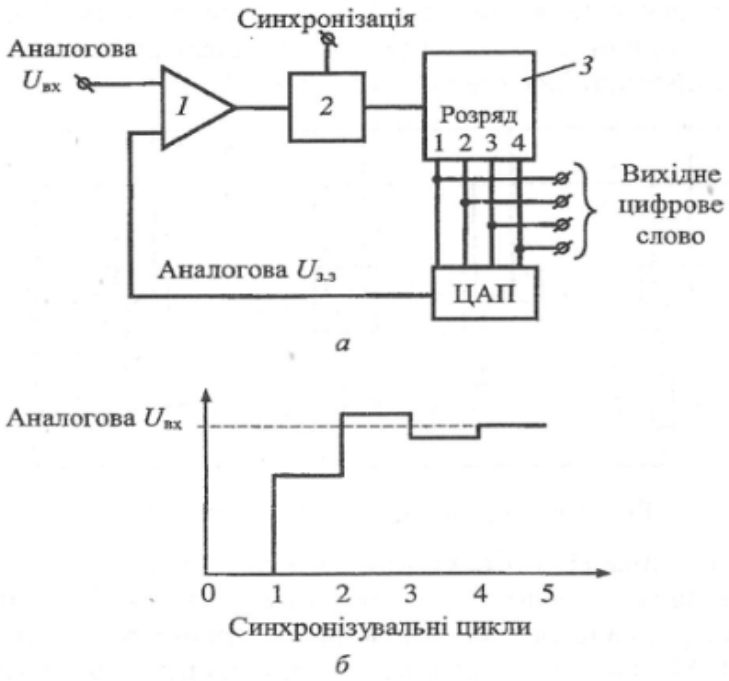


Рис. 2.76. Схема (*а*) та часова діаграма (*б*) АЦП послідовного наближення:
1 – компаратор; 2 – блок керувальної логіки; 3 – регістр

2.15. Системи дистанційного передавання вимірювальної інформації

2.15.1. Системи дистанційного передавання вимірювальної інформації на базі реостатних перетворювачів

Реостатні перетворювачі (РП) застосовують як передавальні, а в мостових вимірювальних схемах дистанційного передавання сигналів – і як слідкувальні. Передавальні РП призначені для перетворення кутових та лінійних переміщень вихідних кінематичних пристроїв вимірювальних приладів в електричний сигнал, який передається в лінію дистанційного передавання. Вихідний параметр РП - активний опір, розподілений лінійно або за деяким законом залежно від переміщення рухомого контакту (повзунка).

Реостатні перетворювачі встановлюють у різних приладах, наприклад, в автоматичних мостах, потенціометрах, у поплавкових рівнемірах, дистанційних покажчиках положення тощо.

Принципову мостову схему дистанційного передавання вимірювальної інформації з використанням двох РП, побудовану за принципом компенсації переміщення, показано на рис. 2.77. Один з них, установлений в одноточковому вторинному приладі 1, передавальний, а другий, встановлений у дублювальному приладі 2, виконує функцію слідкувального, тобто він відслідковує (дублює) дані першого приладу. Перетворювачі з постійними манганіновими резисторами R_1 R_2, R_3 та R_4 утворюють схему автоматичного зрівноваженого моста.

Для підганяння опору з'єднувальних проводів до заданого використовують магазинні резистори $R_{п1}$ та $R_{п2}$. Конденсатор C_1 разом з котушкою

обмотки керування (ОК) утворюють коливальний LC-контур, налагоджений на підсилення основного сигналу (50 Гц). Крім того, конденсатори C_1 і C_3 шунтують індуктивні складові струмів ОК і обмотки збудження (ОЗб), а Сг забезпечує фазовий зсув магнітного потоку ОК на 90° відносно магнітного потоку мережі живлення.

У разі порушення рівноваги мостової схеми в результаті переміщення повзунка РП-1 на вхід електронного підсилювача (ЕП) надходить сигнал розбалансування ΔU з діагоналі *cd*. Там він підсилюється до значення, достатнього для приведення в дію реверсивного двигуна (РД) дублювального приладу. Вихідний вал РД, кінематично зв'язаний з повзунком слідкувального РП-2 та кареткою покажчика, пересуває їх доти, доки не буде досягнено рівноваги мостової схеми. При цьому покажчик дублювального приладу 2 покаже (продублює) значення вимірюваного параметра, яке показує покажчик приладу 1.

Основна перевага розглянутої мостової вимірювальної схеми дистанційного передавання вимірювальної інформації – досить висока точність та незалежність даних від зміни напруги живлення.

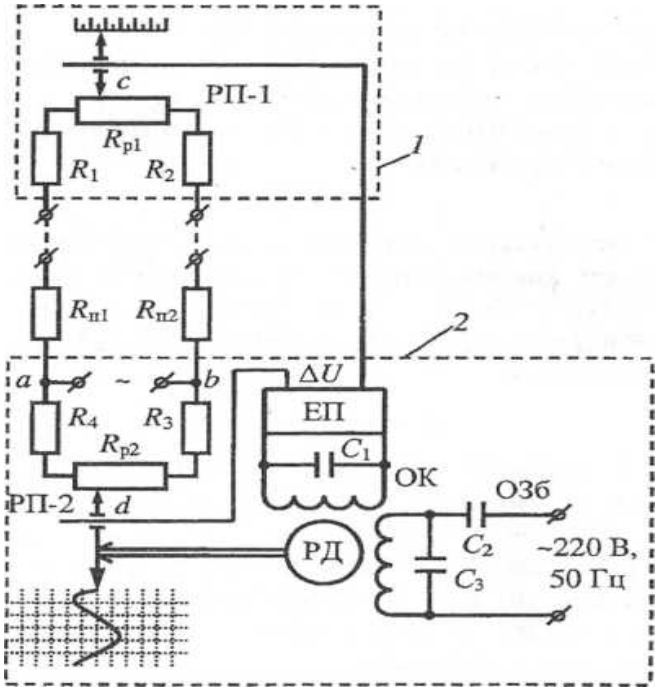


Рис. 2.77. Схема дистанційного передавання вимірювальної інформації на базі РП:

1 - вимірювальний прилад; 2 - дублювальний прилад

2.15.2. Системи дистанційного передавання вимірювальної інформації на базі диференціально-трансформаторних перетворювачів

Принцип дії диференціально-трансформаторної системи (ДТС) ґрунтується на компенсації електрорушійних сил (ЕРС) первинного вимірювального перетворювача і вторинного перетворювача (ВП).

До складу ДТС (рис. 2.78) входять два однакових диференціально-тран сформаторні перетворювачі (ДТП1 і ДТП2), розміщені відповідно у давачу та вторинному перетворювачі. Перетворювачі мають первинну *I* і вторинну *II* обмотки.

Первинні обмотки намотані по всій довжині катушки перетворювача, а вторинні розділені на дві секції, кожна з яких розміщена на відповідній половині первинної обмотки. Всередині кожного перетворювача знаходяться металеві осердя 1 і 2, які переміщуються відповідно чутливим елементом давача і лекалом 4 ВП. Первинні обмотки системи ввімкнені послідовно і живляться змінним струмом від електронного підсилювача 5. Вторинні обмотки системи увімкнені зустрічно й під'єднані до підсилювача 5 вторинного приладу.

Якщо осердя перетворювачів перебувають у середньому положенні, то різницева електрорушійна сила вторинних обмоток обох перетворювачів дорівнюватиме нулю, оскільки у зустрічно ввімкнених секціях наведені ЕРС рівні між собою:

$$e_1 = e_2;\ E_1 = 0;\ e_3 = e_4;\ E_2 = 0. \qquad (2.124)$$

Сигнал неузгодження при цьому також дорівнюватиме нулю:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 0. \qquad (2.125)$$

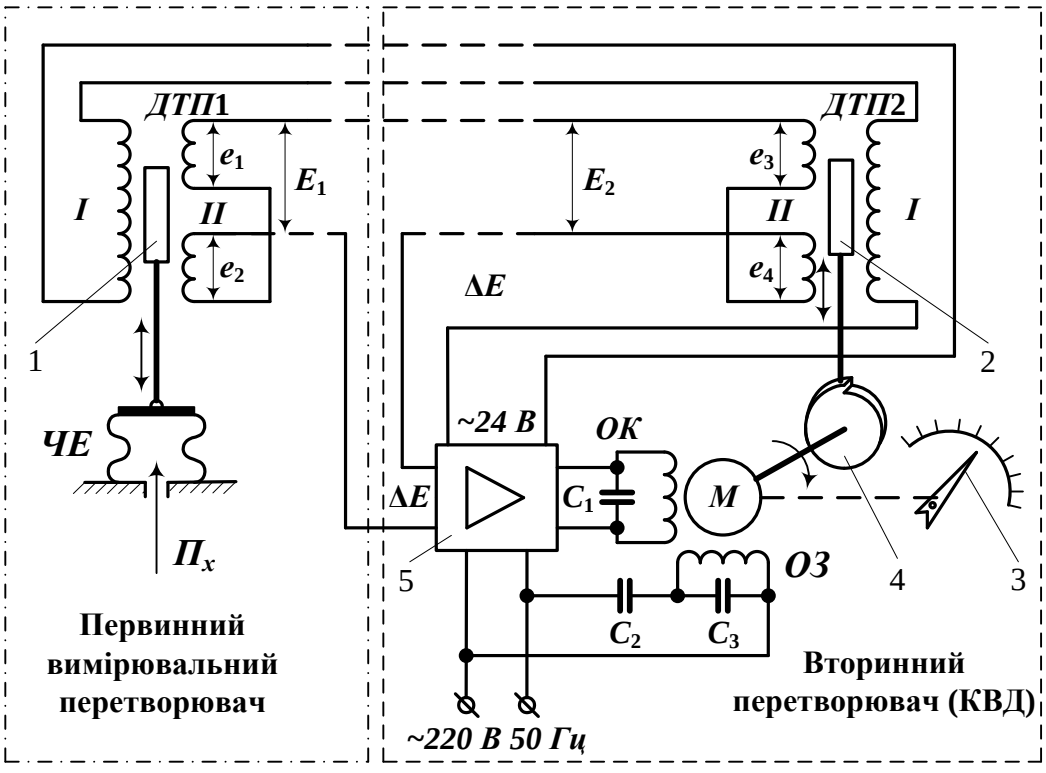


Рис. 2.78. Диференційно-трансформаторна система дистанційної передачі сигналів вимірювальної інформації

При відхиленні осердя 1 від середнього положення під дією чутливого елемента (ЧЕ) наведені ЕРС у секціях ДТП1 змінюються, оскільки змінюється величина взаємоіндукції. Рівність різницевих ЕРС у перетворювачах

системи порушується, і на вхід електронного підсилювача 5 надходить сигнал неузгодження:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \neq 0. \quad (2.126)$$

Сигнал неузгодження підсилюється фазочутливим підсилювачем 5 і на керуючу обмотку реверсивного двигуна *М* подається напруга змінного струму з частотою 50 Гц. На обмотку збудження реверсивного двигуна *М* надходить змінна напруга від мережі частотою 50 Гц зі зсувом по фазі на 90 градусів за рахунок конденсатора C_2. Обертове магнітне поле приводить в обертовий рух ротор реверсивного двигуна *М*, який через редуктор поверне лекало 4 і перемістить осердя 2 ДТП2 вторинного приладу в аналогічне положення плунжера ДТП1 і стрілку 3 у нове положення. При цьому індуковані ЕРС стануть рівними за величиною, взаємокомпенсовуватимуть одна одну, а сигнал неузгодження дорівнюватиме нулю.

Обертове магнітне поле реверсивного двигуна зникає, тому що змінюється частота струму керуючої обмотки на 100 Гц, двигун зупиняється,а стрілка 3 ВП зупиниться на новому значенні вимірюваної величини.

Напрямок обертання реверсивного двигуна *М* залежить від фази вхідного сигналу Δ*Е*, а фаза – від напрямку переміщення осердя давача від зрівноваженого стану системи.

Основна похибка диференціально-трансформаторної передачі дорівнює 1 % при відстані між первинним перетворювачем і вторинним перетворювачем до 1 км.

ДТС – проста, надійна й точна система, однак вона обмежена підключенням лише одного ВП та її використанням у керуючих ЕОМ. Проте останнім часом Івано-Франківський завод випускає дифманометри типу ДМТ зі струмовим перетворювачем (0…5 мА). ДТС працюють із вторинними перетворювачами серії: КВД; КПД; КСД та ін.

2.15.3. Системи дистанційного передавання вимірювальної інформації на базі феродинамічних перетворювачів

До феродинамічної системи дистанційної передачі (рис. 2.79) входять два аналогічних перетворювачі з уніфікованими сигналами (–1…+1 В), з'єднані лініями зв'язку. В основу роботи передачі покладено компенсаційний метод, який полягає в тому, що ЕРС вимірювального перетворювача компенсується ЕРС перетворювача вторинного перетворювача, при цьому $E_1 = E_2$. При однакових кутових положеннях $\angle \alpha_1 = \angle \alpha_2$ на вході електронного підсилювача відсутній сигнал неузгодження:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 0. \quad (2.127)$$

Якщо положення рамок перетворювачів ПФ1 і ПФ2 змінюється, кути нахилу будуть різними $\angle \alpha_1 \neq \angle \alpha_2$, різними також будуть індуковані в них ЕРС: $E_1 \neq E_2$. Сигнал неузгодження Δ*Е* подається на вхід електронного підсилювача ЕП, підсилюється і призводить у рух реверсивний двигун *М*. Останній повертає рамку ПФ2 до наступного зрівноважувального стану.

Стрілка на шкалі вторинного перетворювача покаже нове значення вимірюваного параметра. Клас точності передачі становить 1. Як вторинні перетворювачі використовують показуючі прилади типу ВФП і КВД та самописні ВФС і КСД.

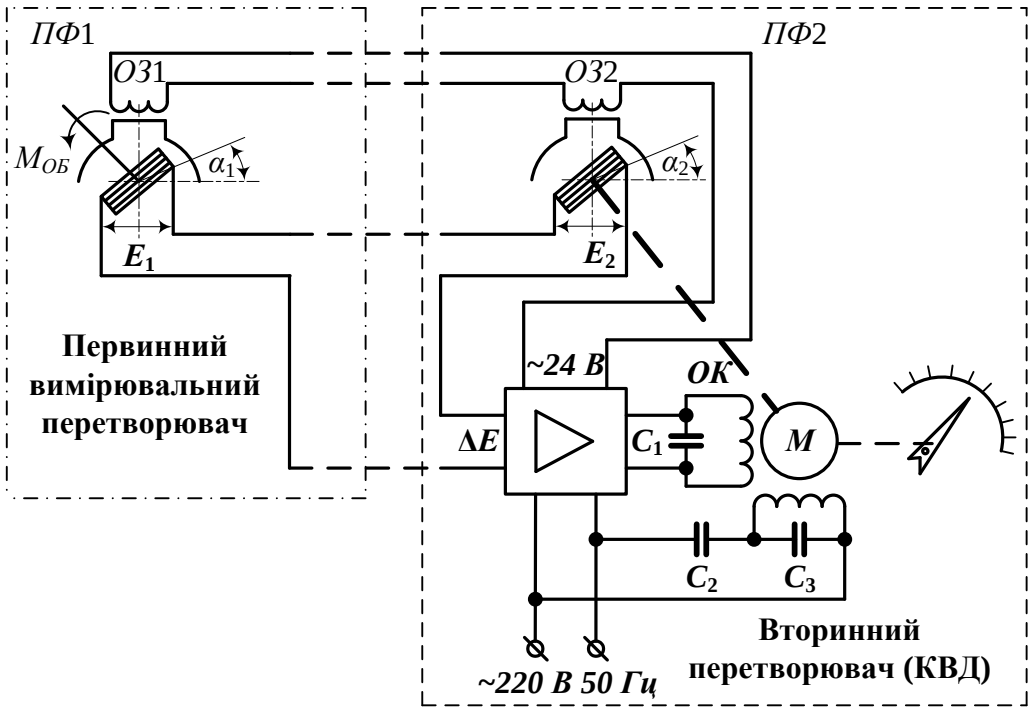


Рис. 2.79. Феродинамічна система дистанційної передачі сигналів вимірювальної інформації

2.15.4. Система дистанційної передачі вимірювальної інформації на базі частотного електричного перетворювача

Для перетворення статичних (що не швидко змінюються) фізичних величин з досить високою точністю (похибка 0,1 %, нелінійність 0,1 %, поріг чутливості 0,03 %) у частотні вихідні сигнали використовують чутливі перетворювальні елементи з вібрувальними струнними, стрижневими, стрічковими, мембранними та іншими наперед механічно напруженими (наприклад, розтягуванням) вібраторами.

Найбільш поширені з таких перетворювачів струнні, що виконують перетворення за схемою *вимірюваний параметр → сила → частота.* Вимірюваним параметром $П_x$ можуть бути тиск, температура (у разі вимірювання манометричним термометром), рівень і т. ін.

Електрична система передавання вимірюваної інформації з уніфікованим частотним сигналом (рис. 2.80) включає ПВП, що складається з ЧЕ, на якому вимірюваний параметр $П_x$ перетворюється в зусилля P_2, та перетворювача «сила – частота», що перетворює зусилля P_2 в уніфікований електричний сигнал.

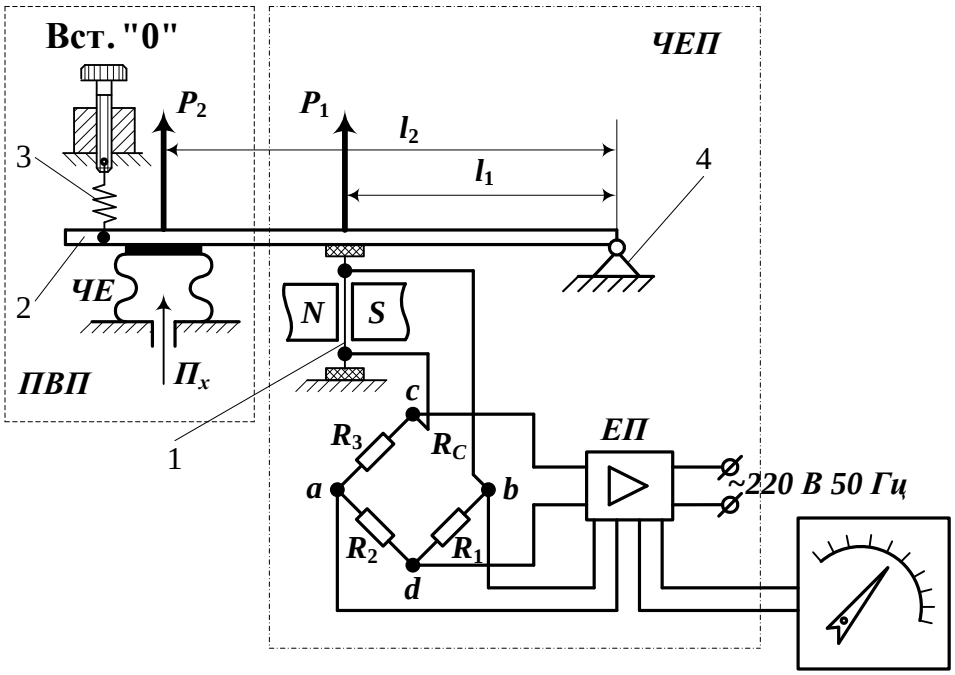


Рис. 2.80. Принципова електрична схема системи дистанційної передачі сигналів вимірювальної інформації на базі ЧЕП:

1 – струна; 2 – рухомий важіль; 3 – встановлення нуля; 4 – опора

Частотний електричний перетворювач (ЧЕП) реалізується на базі струнного генератора, що являє собою мостову схему, утворену резисторами R_1, R_2, R_3 та струною 1 з опором R_C. Електрично ізольована металева струна 1, що проходить між полюсними наконечниками постійного магніту, одним кінцем кріпиться до рухомого важеля 2, а другим – жорстко прикріплена до нерухомої основи. Вимірюваний параметр $П_x$ діє на ЧЕ, який перетворює його в пропорційне зусилля P_2, котре сприймається важелем 2 та пов'язаною з ним струною 1. Якщо по струні перетворювача пропустити змінний струм, то внаслідок взаємодії його з магнітним полем постійного магніту виникає поперечне коливання струни.

Власну частоту поперечних коливань струни/визначають за виразом

$$f = 0{,}5\sqrt{\frac{P_1}{l^2 S\rho}} = \varphi(P_1), \qquad (2.128)$$

де $P_1 = P_2 l_2/l_1$ – сила натягу струни; l, S – відповідно довжина та площа поперечного перерізу струни; ρ – питома вага матеріалу струни.

Змінювання натягу струни, зумовлене зміною вхідного параметра $П_x$, призводить до зміни власної частоти коливання струни, яка перетворюється ЕП у частоту змінного струму (вихідний сигнал перетворювача). Вимірювальна діагональ моста *cd* підключена на вхід ЕП, а його вихід – до діагоналі живлення *ab*.

Еквівалентна електрична схема, що відповідає фізичним процесам, які відбуваються у струні під час її коливання в магнітному полі, має вигляд коливального контуру (рис. 2.81), параметри якого пов'язані з параметрами струни такими співвідношеннями:

$$L = B^2 l^3 S/(2\pi^2 P_1);\ C = 2\rho/(B^2 l);\ R_Д = B^2 lQ/(4\pi\rho f),$$

де L – еквівалентна індуктивність; B – індукція в зазорі постійного магніту; C – еквівалентна ємність; $R_Д$ – динамічний опір коливної струни; Q – добротність резонансного контуру.

Якщо струна нерухома, міст збалансований, а частота $f = 0$, тому динамічний опір струни $R_Д = 0$. У разі збудження автоколивань збільшується еквівалентний опір струни $R_C = R_C + R_Д$, і мостова схема виходить зі зрівноваженого стану. Тобто під час коливань струни 1 мостова схема, що складається з чисто активних опорів, перетворюється в міст із частотно-залежними елементами, позаяк $R_Д = \varphi(f)$. Перетворювач налагоджують на заданий діапазон вимірювання відповідним зміщенням точки опори *4* важеля 2. Початкове значення вихідного сигналу встановлюють коректором нульового сигналу 3.

Розглянутий генератор працює в діапазоні частот 0,1...10 кГц. Струм, який пропускають через струну, не перевищує 100 мкА. Довжина струни становить 20...50 мм, а діаметр – соті частки міліметра (найчастіше – 0,05 мм).

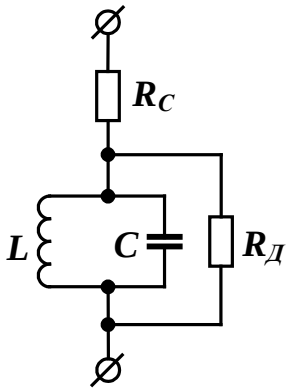


Рис. 2.81. Еквівалентна електрична схема струнного ЧЕП:
R_C – активний опір нерухомої струни

Як видно з рівняння (2.128), статична характеристика струнного ЧЕП нелінійна. З метою лінеаризації статичної характеристики у деяких модифікаціях перетворювачів застосовують квадратори.

Вихідний сигнал побудованого на основі ЧЕП ПВП з лінійною статичною характеристикою можна розрахувати за формулою:

$$f = f_0 + \frac{П_x - П_{\min}}{П_{\max} - П_{\min}} \Delta f, \qquad (2.129)$$

де f_0 – початкова частота; $П_{max}$, $П_{min}$ – відповідно верхня та нижня границі діапазону вимірювання; Δf – діапазон зміни частоти.

Класи точності ПВП з частотним уніфікованим сигналом – 0,5 і 1,0. Дальність передавання інформації – до 10 км.

Контрольні запитання

1. Які вимірювальні перетворювачі відносяться до резисторів?
2. Як розділяються резисторні перетворювачі за схемою включення в електричний ланцюг?
3. Зобразите принципові електричні схеми включення резисторних перетворювачів.
4. Яке призначення і принцип дії потенціометричних перетворювачів?
5. Зобразите статичну характеристику потенціометричного вимірювального перетворювача.
6. Яке призначення і принцип дії тензорезисторних перетворювачів?
7. Як розділяються тензорезисторні перетворювачі залежно від матеріалу чутливого елементу?
8. Яке призначення і принцип дії ємкісних вимірювальних перетворювачів?
9. Яке призначення і принцип дії індуктивних вимірювальних перетворювачів?
10. Що називається синхронним зв'язком і яке її призначення?
11. Яка основна властивість електричної мікромашини характеризує її як сельсин?
12. Зобразите принципову електричну схему включення трифазних сельсинів.
13. Які сельсинні системи синхронної передачі інформації використовуються в автоматиці?
14. У яких випадках для передачі інформації використовуються індикаторна і трансформаторна сельсинні системи?
15. Зобразите принципову електричну схему індикаторної сельсинної системи передачі інформації.
16. Зобразите принципову електричну схему трансформаторної сельсинної системи передачі інформації.
17. Яке призначення і принцип дії трансформаторних вимірювальних перетворювачів?
18. Приведіть класифікацію тахогенераторів за родом використовуваного струму.
19. Приведіть класифікацію імпульсних перетворювачів за способом формування імпульсних вихідних сигналів.
20. Яке призначення і принцип дії п'єзоелектричних вимірювальних перетворювачів?
21. На які групи розділяються п'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі залежно від фізичного принципу дії?
22. Яке призначення і принцип дії фотоелектричних вимірювальних перетворювачів?
23. Яке призначення і принцип дії гальваномагнітних вимірювальних перетворювачів?

24. Яке призначення і принцип дії терморезисторних вимірювальних перетворювачів температури?

25. Яке призначення і принцип дії рідинних і механічних вимірювальних перетворювачів температури?

26. Яке призначення і принцип дії термоелектричних вимірювальних перетворювачів температури?

27. Приведіть класифікацію вимірювальних перетворювачів температури залежно від фізичного принципу дії.

28. Яке призначення і принцип дії напівпровідникових вимірювальних перетворювачів температури?

29. На які групи залежно від вимірюваної електричної характеристики матеріалу розділяються первинні вимірювальні перетворювачі вологості?

30. Які первинні вимірювальні перетворювачі вологості відносяться до електропараметричних?

31. Яке призначення нормуючих перетворювачів?

32. Яке призначення і принципи побудови систем дистанційної передачі сигналів вимірювальній інформації?

33. Назвіть загальні підходи по вибору вимірювальних перетворювачів?

34. Які умови треба враховувати при виборі вимірювального перетворювача?

35. За якими параметрами здійснюється вибір вимірювального перетворювача?

РОЗДІЛ 3
ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

3.1. Загальні відомості

Вимірювання тиску потрібне майже в кожній галузі науки і техніки як для вивчення фізичних процесів, що відбуваються в природі, так і для нормального функціонування багатьох технічних пристроїв і технологічних процесів, створених людиною.

Тиск Р характеризує напружені стани рідин та газів і визначається часткою від ділення нормальної до поверхні сили N на площу F цієї поверхні:

$$P = N/F$$

При цьому припускається, що сила N рівномірно розподілена на поверхні, а в рідині або газі немає дотичних напружень.

У практиці технологічних вимірювань використовують різні види тиску (рис. 3.1).

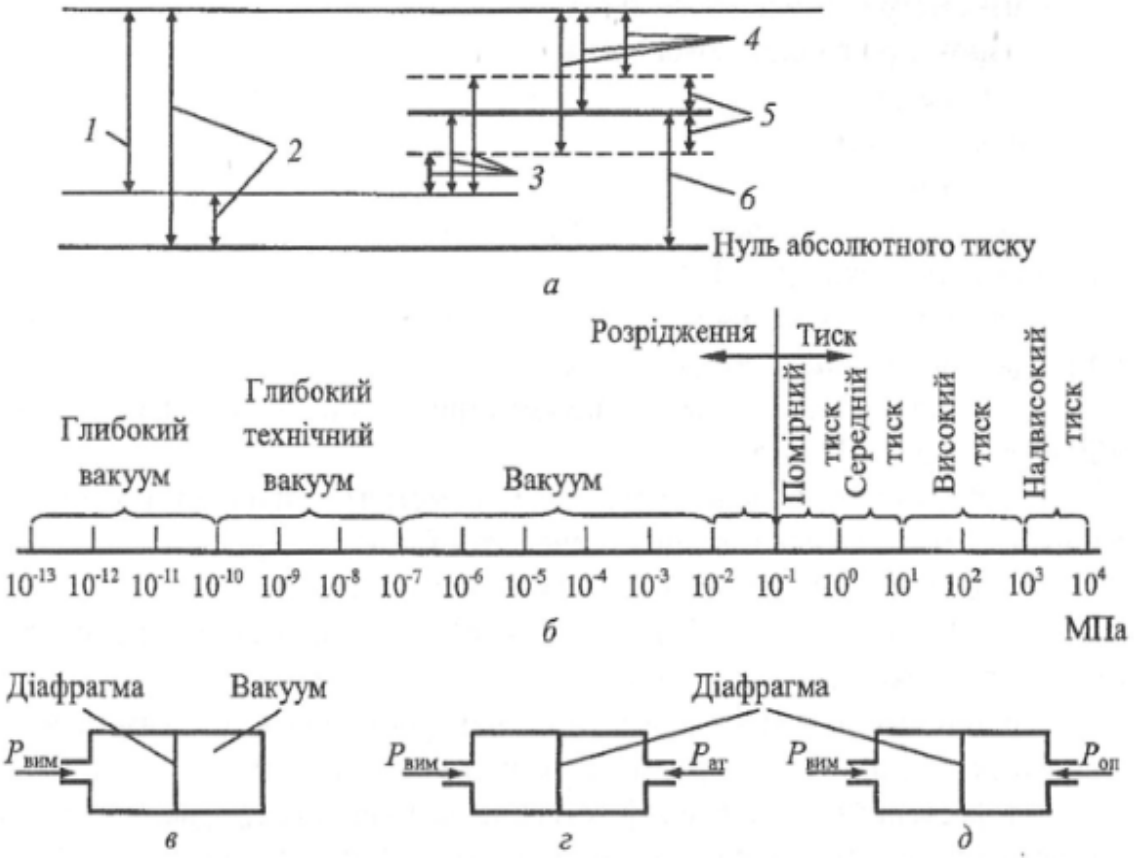


Рис. 3.1. Види (*а*) та шкала (*б*) тисків, принципові схеми вимірювання абсолютного (*в*), надлишкового (*г*) і диференціального (різницевого) (*д*) тисків:
1 – різниця тисків; 2 – абсолютний тиск; 3 – вакуум; 4 – надлишковий тиск; 5 – зміна атмосферного тиску; 6 – атмосферний тиск; $P_{ВИМ}$, $P_{АТ}$, $P_{ОП}$ – вимірюваний, атмосферний і опорний (взятий за нуль відліку) тиски.

Абсолютний тиск (Р) – це тиск, значення якого відраховується від тиску, що дорівнює нулю (абсолютний вакуум). ***Атмосферний*** або

барометричний тиск ($Р_{атм}$) – це абсолютний тиск пароповітряної оболонки Землі на її поверхню на рівні Світового океану (в технічних вимірюваннях цей тиск беруть за нуль відліку). ***Надлишковий*** тиск (*р*) – різниця перепаду тисків, один з яких – барометричний – взято як початок відліку (завжди для вимірювання різниці двох тисків один із них беруть за початок відліку їх різниці).

Надлишковий тиск може бути додатним, якщо $P_{абс} > P_{атм}$, або від'ємним, якщо $P_{абс} < P_{атм}$; в останньому випадку використовується термін *вакуум* – стан середовища, абсолютний тиск якого істотно менший від атмосферного тиску.

Основна одиниця виміру тиску в системі СІ – паскаль (1 *паскаль* – це тиск, створюваний силою 1 Н, рівномірно розподіленою по поверхні площею 1 $м^2$ і спрямованою нормально до неї). Ця одиниця тиску так співвідноситься з несистемними одиницями виміру тиску:

1Па = $1 \cdot 10^{-5}$ бар = $1{,}0197 \cdot 10^{-5}$ кгс/$см^2$ = 0,10197 кгс/$м^2$;

1мм вод. ст. = 9,80665 Па = $1 \cdot 10^{-4}$ кгс/$см^2$;

1мм рт. ст. = 133,322 Па = $13{,}595 \cdot 10^{-4}$ кгс/$см^2$.

За видом вимірюваного тиску розрізняють такі вимірювачі тиску:

– манометри абсолютного тиску;

–манометри надлишкового тиску;

–барометри;

–вакуумметри;

– мановакуумметри;

– напороміри (мікроманометри) – прилади для вимірювання малих надлишкових тисків (до 40 кПа);

– тягоміри (мікроманометри) – прилади для вимірювання невеликого розрідження (не більше мінус 40 кПа);

– тягонапороміри – мановакуумметри з діапазоном вимірювання +20 кПа мінус 20 кПа;

– диференціальні манометри (дифманометри) – прилади для вимірювання диференціального або різницевого тиску (перепаду).

За принципом дії вимірювачі тиску поділяють на такі групи:

– рідинні – ґрунтуються на зрівноваженні вимірюваного тиску гідростатичним тиском стовпа рідини;

– рідино-механічні – крім рідини, використовують для вимірювання тиску різні механічні пристрої (поплавки, дзвони, кільця);

– деформаційні – тиск вимірюється за величиною деформації пружних деформаційних елементів (мембран, пружин, сильфонів тощо);

– поршневі – вимірюваний тиск зрівноважується зовнішньою силою, що діє на поршень;

– електричні – ґрунтуються на перетворенні тиску в якусь електричну величину.

Перші дві групи складаються винятково з диференціальних вимірювачів (підрозд. 3.5), хоча дифманометри – з огляду на їх високу точність вимірювання – часто використовують і для вимірювання «просто» тиску.

3.2. Деформаційні вимірювачі тиску

Принципова відмінність деформаційних манометрів від рідинних та поршневих полягає у використанні пружного чутливого елемента (ПЧЕ) як первинного перетворювача тиску. Під дією вимірюваного тиску пружна оболонка ЧЕ деформується, а виникла в оболонці напруга зрівноважує вимірюваний тиск, який діє на неї і ззовні чи зсередини. Розглянемо найбільш поширені в технологічних вимірюваннях типи ПЧЕ.

Мембрани. Розрізняють пружні та еластичні мембрани. Пружна мембрана – кругла плоска чи гофрована пластина (їх виробляють з різних марок сталі, бронзи, томпаку, латуні тощо), величина прогину δ якої виражає діючий на неї тиск *p* (рис. 3.2).

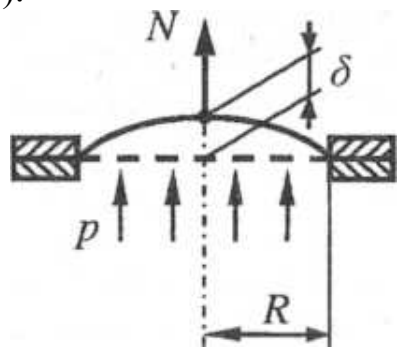


Рис. 3.2. Схема роботи плоскої мембрани

Для зменшення впливу нелінійності статичної характеристики δ =f(p) мембрани та гістерезису на точність вимірювання за робочу ділянку характеристики використовують лише невелику – лінійну – частину можливого ходу. Величину прогину δ центра мембрани для малих зміщень визначають як

$$\delta = \frac{3p(1-\mu^2)R^4}{16Eh^3}$$

де R – робочий радіус мембрани по контуру затискання; h – товщина мембрани; μ – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності матеріалу мембрани.

Гофровані мембрани (рис. 3.3, *а*) працюють зі значно більшими прогинами, ніж плоскі, позаяк нелінійність їх статичної характеристики значно менша. Величину прогину δ центра гофрованих мембран визначають з виразу $a = \delta/h + b\delta^3/h^3 = pR^4/(Eh^4)$, де a та b – коефіцієнти, що залежать від форми профілю мембрани та її товщини. Використовують гофри трикутної, трапецеподібної, синусоїдної та колової форм. Глибина гофра впливає на лінійність статичної характеристики мембран: чим більша глибина гофр, тим вища лінійність статичної характеристики.

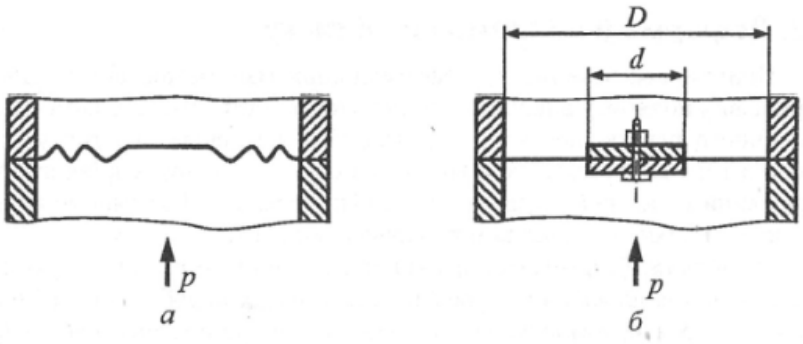


Рис. 3.3. Конструкції мембрани:
а – гофрованої мембрани; *б* – з жорстким центром

Еластичну мембрану призначено для вимірювання малих тисків чи перепаду тисків; вона являє собою затиснені між фланцями плоскі або гофровані диски, виготовлені з прогумованої тканини, тефлону, фторопласту і т. ін. Як плоскі, так і гофровані еластичні мембрани використовують також для створення значних переставних зусиль *N* у разі незначних переміщень.

Переставне зусилля еластичної мембрани залежить від її ефективної площі, яка, помножуючись на перепад тиску, створює зусилля, прикладене до геометричного центра мембрани.

Ефективна площа плоскої еластичної мембрани, затиснутої між фланцями, тобто та частина повної геометричної площі мембрани, яка бере безпосередню участь у перетворенні тиску *p* у зусилля *N* за виразом $N = Fp$, у разі малого прогину мембрани дорівнює приблизно 1/3 її повної геометричної площі (інші 2/3 площі передають зусилля до опори), тобто

$F_{еф} = \pi D^2/12$, де *D* – діаметр мембрани (внутрішній діаметр фланців). Переставне зусилля, створюване такою мембраною, $N = pF_{еф}$.

Зазвичай використовують лише частину максимально можливого ходу мембрани (до 10 %), оскільки за великого ходу мембрани зв'язок між зусиллям *N* і ходом центра мембрани δ нелінійний. Для зменшення нелінійності та збільшення переставного зусилля застосовують еластичні мембрани із жорстким центром, який являє собою два металеві диски, закріплені з двох боків на мембрані (рис. 3.3, *б);* вільна частина мембрани, що залишилася між дисками жорсткого центра та кріпильними фланцями, утворює еластичне мембранне кільце.

Зусилля, створюване мембраною з жорстким центром під дією тиску *p,* описується виразом

$$N = \pi(D^2 + Dd + d^2)p/12$$

де π ($D^2 + Dd + d^2$)/ 12 – ефективна площа мембрани з жорстким центром; *d* – діаметр жорсткого центра.

Для збільшення прогину в приладах для вимірювання малих тисків (розріджень) використовують мембранні коробки (рис. 3.4), що складаються з двох гофрованих мембран, з'єднаних по периметру. Деформація такої коробки дорівнює сумі деформацій мембран, що її утворили. Для подальшого

підвищення чутливості мембранні коробки можна об’єднувати у мембранні блоки.

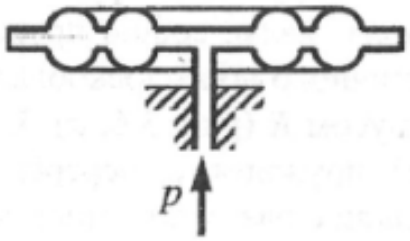


Рис .3.4 Мембранна коробка

Крім уже названих вад, мембранним ЧЕ властиві також значні відхилення жорсткості мембран від розрахункової та складність регулювання жорсткості мембран. Однак ці вади усуваються в приладах, побудованих за схемою силової компенсації.

Сильфони. Сильфон – тонкостінна циліндрична оболонка з поперечними гофрами (рис. 3.5), здатна забезпечувати значні переміщення під дією тиску або сили.

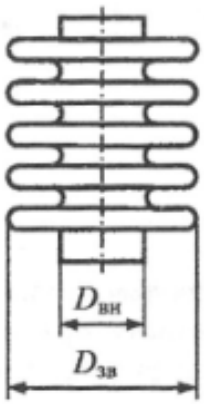


Рис. 3.5 Сильфон

У межах лінійності статичної характеристики сильфона відношення діючої на нього сили до спричиненої нею деформації залишається постійним і називається *жорсткістю* сильфона. Для збільшення жорсткості всередину сильфона часто помішують пружину. Сильфони виготовляють із бронзи різних марок, півтомпаку, вуглецевої сталі, іржостійкої сталі, алюмінієвих сплавів тощо. Серійно роблять безшовні й зварні сильфони діаметром від 8... 10 до 80... 100 мм і товщиною стінки 0,1...0,3мм – широкий діапазон типорозмірів, а також матеріалу та кількості гофр дозволяють досягти потрібної величини робочого ходу, а отже, й чутливості сильфонного перетворювача.

Ефективну площу сильфона, що за значних переміщень його дна залишається майже незмінною, визначають за формулою

$$F_{сф} = \pi(D_{вн} + D_{зв})^2/16$$

де $D_{вн}$ і $D_{зв}$ внутрішній і зовнішній діаметри гофра сильфона.

Значно більший, ніж у мембран, робочий хід сильфонів досягає 5…10мм, що дозволяє використовувати їх у самописних приладах.

Трубчасті пружини. Трубчаста пружина (одновиткова манометрична пружина, трубка Бурдона) являє собою пружну тонкостінну металеву порожнисту трубку еліптичного або плоскоовального перерізу, вісь якої вигнуто по дузі кола радіусом R (рис. 3.6, *а*). Із подачею тиску у внутрішню порожнину трубчастої пружини її переріз прагне набути форми кола (рис. 3.6, *б*), тобто мала вісь овалу чи еліпса збільшується, а велика, навпаки, зменшується, що зумовлює розкручування пружини.

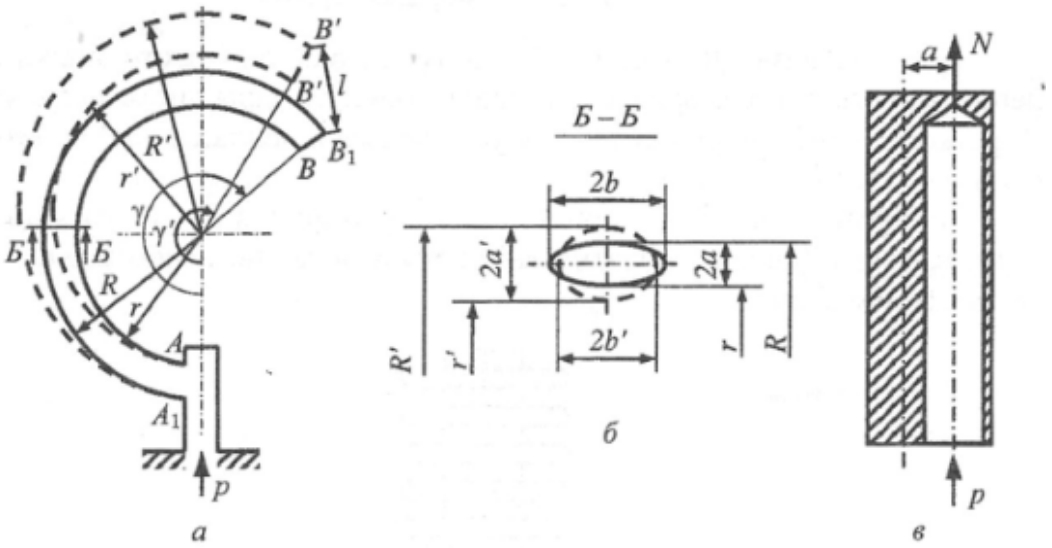


Рис. 3.6. Схема зміни кута закручування одновиткової трубчастої пружини (*а*) та її перерізу (*б*) під дією тиску; прямолінійна трубчаста пружина з ексцентричним каналом (*в*)

Покажемо це. Довжини внутрішньої та зовнішньої дуг трубчастої пружини можна записати як

$$\cup AB = r\gamma, \cup A_1B_1 = R\gamma,$$

де r і R – радіуси внутрішньої та зовнішньої дуг; γ – початковий кут закручення трубчастої пружини.

У разі деформування (зміни кута закручення) трубчастої пружини під дією підведеного тиску p до γ' відповідно зміняться радіуси внутрішньої та зовнішньої дуг (відповідно r' *і* R'), але довжина дуг (фактично – довжина трубки) залишиться майже незмінною. Тому

$$R\gamma = R'\gamma', a\ r\gamma = r'\gamma'$$

Віднявши від першого виразу другий, отримаємо $(R - r)\gamma = (R' - r)\gamma'$, або (рис. 3.6, *б*) $a\gamma = a'\gamma'$, де $2a$ і $2a'$ – розміри малої осі еліпса поперечного перерізу трубчастої пружини до та після її деформації відповідно за рахунок подачі тиску p у її внутрішню порожнину. А позаяк $a' > a$, то $\gamma' < \gamma$, тобто з подачею (або зі збільшенням) тиску p трубчаста пружина розкручується, що спричинює лінійне переміщення l її вільного кінця:

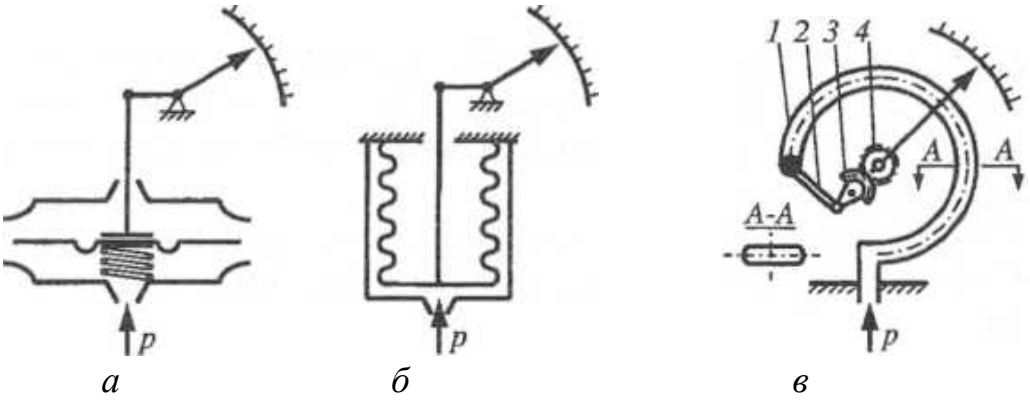
$$l = TR(\frac{\Delta\gamma}{\gamma})$$

де T – коефіцієнт, залежний від центрального кута трубчастої пружини;

$\Delta\gamma/\gamma$ – відносний кут повороту вільного кінця пружини під дією тиску.

Для вимірювання надвисокого тиску (до 1000 МПа) використовують одновиткові та прямолінійні трубчасті пружини з ексцентричним поздовжнім каналом циліндричної форми – трубки Нагаткіна (рис. 3.6, *в*), деформація яких зумовлюється дією згинального моменту $M = a\,N$ (тут a – плече дії сили N відносно поздовжньої осі, що проходить через центр маси трубки).

Вихідні сигнали деформаційних ПЧЕ (переміщення чи зусилля) перетворюються в конкретній конструкції вимірювального приладу (окремі приклади конструктивної реалізації цієї процедури показано на рис. 3.7) на показання значень виміряної величини тиску p.



а *б* *в*

Рис. 3.7. Схеми деформаційних вимірювальних перетворювачів тиску:
а – плоска мембрана; *б* – сильфон; *в* – одновиткова трубчаста пружина;1 – трубчаста пружина; 2 – тяга; 3 – поворотний зубчастий сектор; 4 – шестірня

Наприклад, у конструкції з одновитковою трубчастою пружиною (рис. 3.7, *в*) перетворення переміщення її вільного кінця у зміщення стрілки відлікового пристрою здійснюється за допомогою тяги 2, поворотного зубчастого сектора 3 та шестерні 4, на якій закріплено стрілку.

3.3. Поршневі вимірювачі тиску

Рівняння рівноваги сил найпростішого поршневого манометра (рис. 3.8) має вигляд

$$G = T + pF$$

де G – сила, прикладена до поршня; p – вимірюваний тиск; F – площа поперечного перерізу поршня; T – сила рідинного тертя до бокової поверхні. Після перетворення (почленного ділення на *p)* одержимо

$$p = \frac{G}{F + \frac{T}{p}} = \frac{G}{F_{\text{еф}}} = kG$$

де $k = 1 / F_{еф}$; $F_{еф} = F + T/ p$ – ефективна площа поршня.

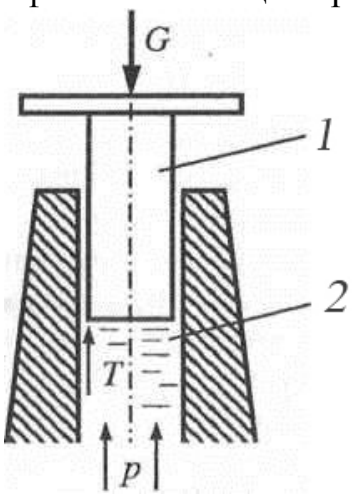


Рис. 3.8. Схема поршневого манометра:
1 – поршень; 2 – циліндр

Теоретичні й експериментальні дослідження показали, що сила рідинного тертя T пропорційна тискові p, тобто T / p = const. Тому $F_{еф}$ не залежить від тиску, з чого випливає, що вимірюваний тиск прямо пропорційний силі, яка зрівноважує його.

Найбільш часто вимірюваний тиск зрівноважують вагою зовнішнього навантаження (набір дисків-важок). Рівняння вимірювання цих манометрів має вигляд

$$p = mg/F_{еф}$$

де m – маса навантаження та поршня.

Завдяки нестисливості використовуваного робочого тіла (рідини) поршневі вимірювачі тиску мають дуже високий клас точності (0,02; 0,05), тому їх широко використовують для перевірки манометрів і вакуумметрів (зокрема, й зразкових), а також дифманометрів (рис. 3.9).

Існують автоматичні вимірювачі тиску такого виду, наприклад, тягаропоршневий манометр з автоматичним установленням дисків-важок і компенсаційною системою різниці (недокомпенсації) між вимірюваним тиском і тиском, створеним поршнем. Такі вимірювачі використовують для вимірювання гідростатичного тиску в інформаційно-вимірювальних системах для кількісного обліку нафтопродуктів у резервуарних парках.

Попри високу точність вимірювання (клас точності 0,05), ці вимірювачі вирізняються низькою оперативністю вимірювання, зумовленою послідовним установленням дисків-важок та їх великою кількістю (n = ДВ / q_k, де ДВ – діапазон вимірювання; q_k – ступінь дискретності вимірювання тиску).

Цих вад позбавлений зображений на рис. 3.10 автоматичний вимірювач тиску [19], у якому роль поршня відіграє сильфон.

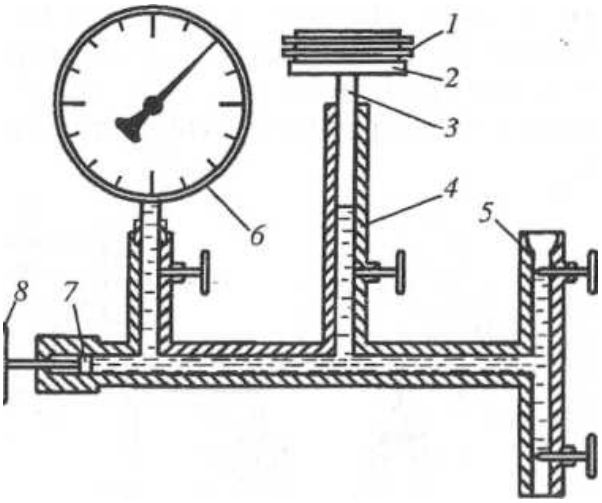


Рис. 3.9. Схема перевірки манометрів поршневим вимірювальним перетворювачем тиску:

1 – важки (диски); 2 – тарілка; 3 – поршень; 4 – циліндр; 5 – штуцер для заливання робочої рідини; 6 – вивірюваний манометр; 7 – поршень; 8 – маховичок

Вимірювач реалізує принцип компенсації зусиль. Вимірюваний гідростатичний тиск перетворюється ПЧЕ (сильфони, герметично закріплені в циліндричних оболонках) 1 і 8 у зусилля, які через кінематичні елементи 9 підводяться до важеля-суматора 10, з яким також сполучаються перетворювач «сила – тиск» 17 та пристрій термокомпенсації 12 (їх робочі об'єми, утворені однаковими сильфонами, заповнені однією рідиною, тому зміна температури довкілля призведе до виникнення в них однакових зусиль, які взаємно скомпенсуються на суматорі 10).

За значенням виміряного широкодіапазонним вимірювачем тиску 13 блок керування 15 за допомогою блока встановлення важок 18 встановлює початкову комбінацію важок 19 на важіль 10. Різниця між зусиллям від вимірюваного гідростатичного тиску, сформованим ЧЕ 1 і 8, та компенсувальним зусиллям від установленої комбінації важок, тобто величина недокомпенсації згаданих сил, перетворена перетворювачем 17 у тиск, вимірюється вузькодіапазонним вимірювачем тиску 14. За результатом цього вимірювання уточнюється комбінація важок 19 на важелі 10, а різниця (вона має бути меншою за q_k - тиск, який виникає на виході перетворювача 17 зі встановленням на важіль найменшої з важок 19), виміряна вимірювачем 14, додається до тиску, сформованого остаточною комбінацією важок 19.

Важливою конструктивною особливістю розглянутого вимірювача тиску є те, що встановлення важок на важіль-суматор створює дискретні значення тиску, які відповідають двійковому кодові. Це дозволяє значно скоротити кількість важок. Наприклад, якщо для вимірювання тиску в діапазоні 0,0025...0,08 МПа з дискретністю 0,025 поршневим вимірювачам потрібно більше тридцяти дисків-важок (0,8:0,025), то компенсаційному вимірювачу з набором дискретних значень тиску у двійковому коді – лише шість важок.

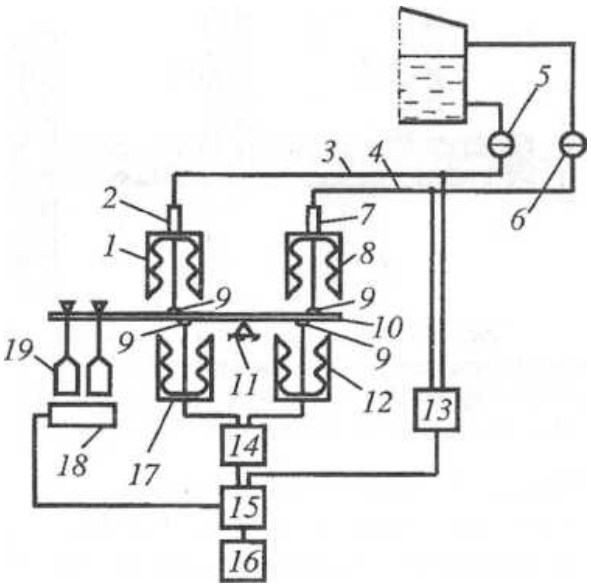


Рис. 3.10. Пристрій для вимірювання гідростатичного тиску рідин:
1,8 – основний та додатковий ПЧЕ; 2,7 – вхідні штуцери; 3,4 – імпульсні лінії; 5,6 – розділювальні посудини; 9 – рухомі кінематичні елементи; 10 – важіль-суматор; 11 – опора; 12 – пристрій термокомпенсації; 13 – широкодіапазонний (грубий) вимірювач тиску; 14 – вузькодіапазонний (точний) вимірювач тиску; 15 – блок керування; 16 – блок відображення інформації; 17 – перетворювач «сила – тиск»;18 – блок установлення важок; 19 – важки

При цьому нижню комбінацію важок установлюють на важелі 10 відразу ж, а не послідовно, тому оперативність вимірювання буде високою. До того ж клас точності компенсувальних важок на точність одержуваних значень $p_к$ не впливає, оскільки тискоутворювальним параметром є не вага важок, а створюваний на важелі-суматорі момент (його легко підстроїти, пересовуючи важки вздовж важеля 10).

3.4. Електричні вимірювачі тиску

Крім «чисто» електричних вимірювачів тиску, якими є п’єзоелектричні вимірювачі тиску, магнітопружні, іонізаційні манометри тощо, до цієї групи традиційно належать також індуктивні, диференціально-трансформаторні, ємнісні та ін. Чутливими елементами ємнісних вимірювачів є різні деформаційні пружні елементи, що перетворюють вимірюваний тиск у зміщення (деформацію) ЧЕ або зусилля.

3.4.1. Індуктивні вимірювачі тиску

Схему вимірювального перетворювача тиску, оснащеного індуктивним перетворювачем, показано на рис.3.11,*а.*

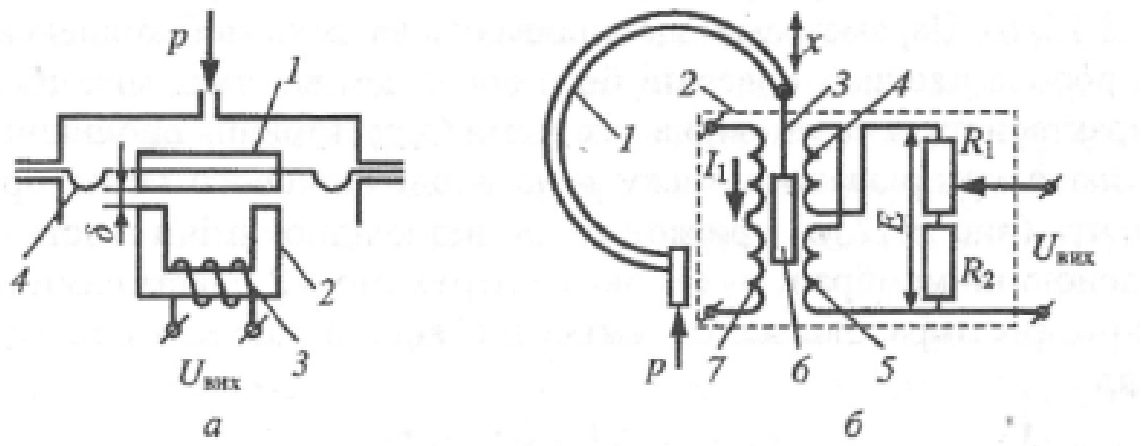


Рис. 3.11. Схеми індуктивного (*а*) та диференціально-трансформаторного (*б*) вимірювальних перетворювачів тиску:

а: 1 – жорсткий центр; 2 – електромагніт; 3 – обмотка; 4 – мембрана; б: 1 – манометрична пружина; 2 – ДТП; 3 – шток; 4,5 – секції вторинної обмотки;6 – плунжер; 7 – первинна обмотка

Мембрана, що сприймає тиск р, має жорсткий центр 1, який є якорем електромагніта 2 з обмоткою 3. Під дією вимірюваного тиску р мембрана деформується, її жорсткий центр переміщується, змінюючи повітряний зазор δ. Це призводить до зміни електричного опору індуктивного перетворювального елемента (див. п. 2.3.2) та відповідно його вихідного сигналу.

3.4.2. Диференціально-трансформаторні вимірювачі тиску

Схему вимірювального перетворювача тиску, оснащеного ДТП 2, зображено на рис. 3.11, б. Зміна вимірюваного тиску р спричиняє зміщення плунжера 6, кінематично з'єднаного з вільним кінцем манометричної пружини і. Під час проходження первинною обмоткою 7 струму виникають магнітні потоки, що індукують у секціях 4 та 5 вторинної обмотки відповідні ЕРС, пропорційні зміщенню х плунжера 6 (див. п. 2.3.4). Таким чином, вихідний сигнал ДТП $U_{вих}$ буде пропорційним значенню вимірюваного тиску р.

Первинні вимірювальні перетворювачі тиску з ДТП мають такі типові метрологічні характеристики: лінійність ±0,5...1 % від діапазону вимірювання; гістерезис – менше ніж 0,05 % від діапазону вимірювання; власна частота – 5.. .250 кГц; вихідний сигнал – 50.. .500 мВ. Переваги ПВП з ДТП: великий вихідний сигнал, малий гістерезис, можливість застосування в агресивному середовищі (наприклад, за наявності іонізувальних випромінювань); недолік – чутливість до ударів і вібрацій.

3.4.3. Ємнісні вимірювачі тиску

Існують дві основні конструкції таких вимірювачів: одностаторна, у якій ЧЕ (зазвичай діафрагма) має одну пластину конденсатора й перемішується відносно його другої, нерухомої, пластини (рис. 3.12, *а*), і двостаторна, у якій діафрагма переміщується між двома нерухомими пластинами (рис. 3.12, *б*). Параметрами, що впливають на ємність *С* конденсатора, служать робоча площа *S* поверхні його обкладки, відстань між обкладками δ та характеристика середовища між ними (діелектрична проникність $\mathcal{E}$).

Зміна вимірюваного тиску *p* на вході ємнісного перетворювального елемента (рис. 3.12, *а*) призводить до відповідної зміни відстані δ між закріпленою на мембрані рухомою *1* і нерухомою 2 пластинами (електродами) конденсатора. Залежність ємності *С* від відстані між пластинами δ має вигляд

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S/(\delta_0 + \delta)$$

де $\mathcal{E}$ – діелектрична проникність середовища, що заповнює міжелектродний зазор; *S* – робоча площа пластин ємнісного перетворювального елемента;

δ – відстань між пластинами конденсатора, пропорційна вимірюваному тискові; δ_0 – відстань між пластинами за нульового тиску.

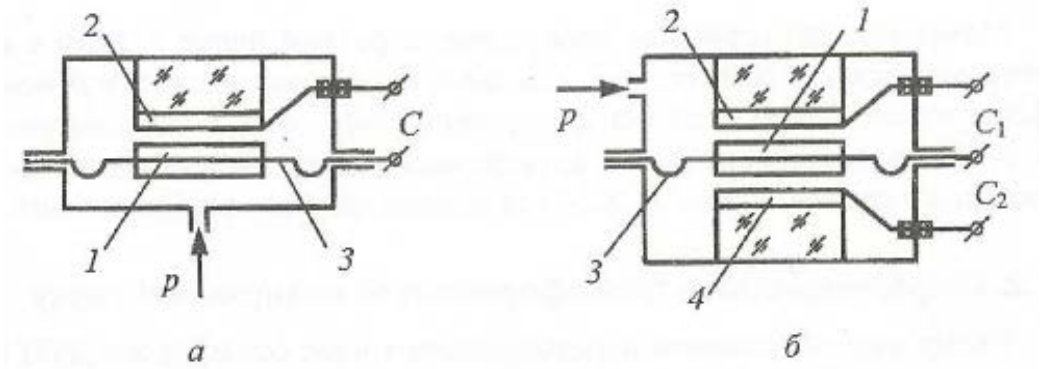


Рис. 3.12. Схеми одностаторного (*а*) та двостаторного (диференціального) (*б*) ємнісних вимірювальних перетворювачів тиску:

1 – рухома пластина; 2,4 – нерухомі пластини (електроди); 3 – мембрана

Для малих змін відстані між обкладками конденсатора залежність його ємності С від зміни Δδ відстані між рухомою і нерухомою пластинами можна вважати лінійною:

$$\frac{\Delta C}{C} = -\Delta\delta/\delta_0$$

На практиці, в одностаторній конструкції, ця залежність складніша. У цьому випадку, щоб похибка через відхилення від лінійності не перевищувала заданої величини *n* (%), переміщення мембрани обмежується умовою $\Delta\delta < (n/50)\delta_0$

Так, якщо $\Delta\delta_0 = 50$ мкм і *n* = 0,5 %, цій умові відповідає прогин мембрани 0,5 мкм.

Як і в індукційних перетворювачах, у ємнісних залежність між ємністю та зміщенням рухомої пластини нелінійна. Щоб зменшити нелінійність для

вимірювання малих зміщень (від 1 мкм до 1 мм), найчастіше використовують диференціальні ємнісні перетворювачі (рис. 3.12, *б*).

Власна частота коливань f_0 сталевої мембрани досить велика (200 кГц і більше), тому ємнісні перетворювачі можна використовувати для вимірювання швидкозмінних тисків. У разі прямого контакту мембрани з рідиною, густиною якої знехтувати не можна, власна частота її коливань зменшується. Тому для визначення f_0 потрібно вводити поправку, що враховує співвідношення між густиною рідини та питомою вагою матеріалу мембрани.

Завдяки простій конструкції ємнісні вимірювачі досить міцні і їх можна використовувати для вимірювання тиску до 120 МПа. Метрологічні характеристики ємнісних перетворювачів: лінійність – 0,5...2 % від діапазону вимірювання; гістерезис – менше 0,02 %; відтворюваність – 0,1...2; похибка – 0,2...0,5 % від діапазону вимірювання; частотна характеристика (власна частота) – 50...200 кГц (залежно від діаметра та товщини мембрани); вихідний сигнал – 20.. .200 мВ.

До переваг ємнісних вимірювачів тиску слід віднести малу масу (а отже, високу швидкодію: стала часу становить 10^{-4} с) та низьку чутливість до прискорень; вадою є чутливість до температури. Відхилення нуля й чутливість залежно від температури становлять 0,5 %/°С, але можуть досягати й

1 %/°С. У цих випадках необхідно передбачити систему охолодження.

3.4.4. Вимірювальні тензоперетворювачі тиску типу «Сафір»

Перетворювачі призначено для роботи в системах автоматичного контролю та керування технологічними процесами. Вони забезпечують неперервне перетворення значення вимірюваного параметра – тиску (надлишкового, абсолютного, гідростатичного), розрідження, різниці тисків нейтральних і агресивних середовищ – в уніфікований струмовий вихідний сигнал.

Перетворювачі «Сафір»(виробник – ЗАТ «Манометр», м. Харків (аналогічні за характеристиками тензоперетворювачі «Сапфир-22» виробляють ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ і АТ «СП Манометр», м. Харків) належать до виробів Державної системи приладів і засобів автоматизації. Вони витримують сейсмічні навантаження до 9 балів, мають вибухобезпечний рівень вибухозахисту (залежно від моделі). їх можна застосовувати у вибухонебезпечних зонах приміщень і зовнішніх установок згідно з вимогами нормативно-технічних документів щодо застосування енергоустаткування у вибухонебезпечних середовищах.

Перетворювачі призначено для роботи з вторинною показувальною та реєструвальною апаратурою, регуляторами та іншими пристроями автоматики, машинами централізованого контролю і системами керування, що працюють зі стандартними вхідними сигналами 0...5, 0...20 або 4...20 мА постійного струму. Граничнодопустиме значення основної похибки

$\delta_{доп}$= ±0,25 %. Верхні границі вимірювань (надлишковий тиск від 0,25 кПа до 100 МПа, розрідження від мінус 0,25 до мінус 100 кПа) залежать від моделей перетворювачів.

Тензоперетворювач тиску складається з вимірювального пристрою та електронного блока. Перетворювачі різних параметрів мають уніфікований електронний пристрій і розрізняються лише конструкцією вимірювального блока.

Вимірюваний параметр входить у камеру вимірювального блока і лінійно перетворюється в деформацію ЧЕ та зміну електричного опору тензорезисторів тензоперетворювача, розміщеного у вимірювальному блоці.

Схему перетворювача тиску типу «Сафір» зображено на рис. 3.13.

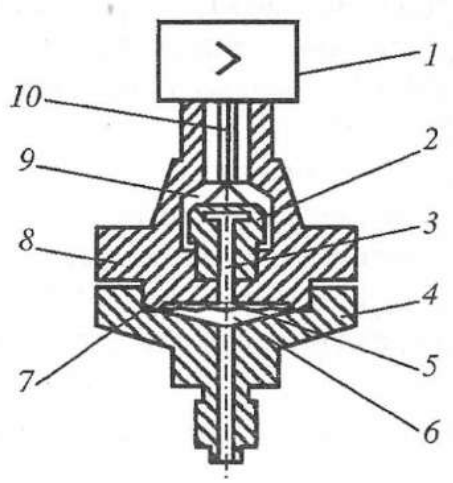


Рис. 3.13. Схема перетворювачів тиску «Сафір» моделей 2150, 2160, 2170 та 2350:

1 – електронний пристрій; 2 – мембранний тензоперетворювач; 3 – внутрішня порожнина тензоперетворювача; 4 – фланець; 5 – металева гофрована мембрана; 6 – камера фланця 4; 7 – прокладка; 8 – основа; 9 – порожнина; 10 – гермовивід

Чутливим елементом тензоперетворювача є пластина з монокристалічного сапфіра з кремнієвими плівковими тензорезисторами, міцно з'єднана з металевою мембраною тензоперетворювача. Мембранний тензоперетворювач 2 розміщено всередині основи 8. Внутрішня порожнина 3 тензоперетворювача заповнена кремнієорганічною рідиною і відділена від вимірюваного середовища металевою гофрованою мембраною 5, привареною по периметру до основи 8. Порожнина 9 сполучена з навколишньою атмосферою. Вимірюваний тиск подається в камеру 6 фланця 4, ущільненого прокладкою 7.

Вимірюваний тиск діє на мембрану 5 і через рідину – на мембрану тензоперетворювача 2, спричиняючи її деформування та зміну опору тензорезисторів. Електричний сигнал від тензоперетворювача через гермовивід 10 передається з вимірювального блока в електронний пристрій 1, де перетворюється в уніфікований струмовий сигнал.

3.4.5. Струнні вимірювачі тиску

Первинні вимірювальні перетворювачі тиску з натягнутими металевими струнами за деякими властивостями подібні до п'єзорезистивних перетворювачів у вигляді тонкого шару, однак вони більші за габаритами і недостатньо міцні. Залежно від конструкції власна частота таких ПВП може змінюватися від 1000 до 40000 Гц. Струнні ПВП вирізняються широким діапазоном їх застосування за температурою та стабільністю характеристик, що особливо важливо для вимірювань упродовж тривалого часу.

Струни, натягнені між нерухомою точкою корпуса та ЧЕ, наприклад мембраною, заздалегідь піддають напруженню. їх опір (вихідний параметр) може збільшуватись або зменшуватись залежно від напряму зміщення точки кріплення струни до динамометричного елемента. Так, у конструкції, показаній на рис. 3.14, а, завдяки пружинам 3, 4 змінюються в протилежних напрямах опори двох половин струн 2 та 5, на один кінець яких діє ЧЕ (тут – мембрана 1). Вимірюваний тиск, діючи на мембрану, зумовлює зміщення точок кріплення *a* вниз. При цьому довжина струнного перетворювача *ac* укорочується, переносячи натяг пружин 3 та 4 на перетворювач *bc,* який, навпаки, подовжується.

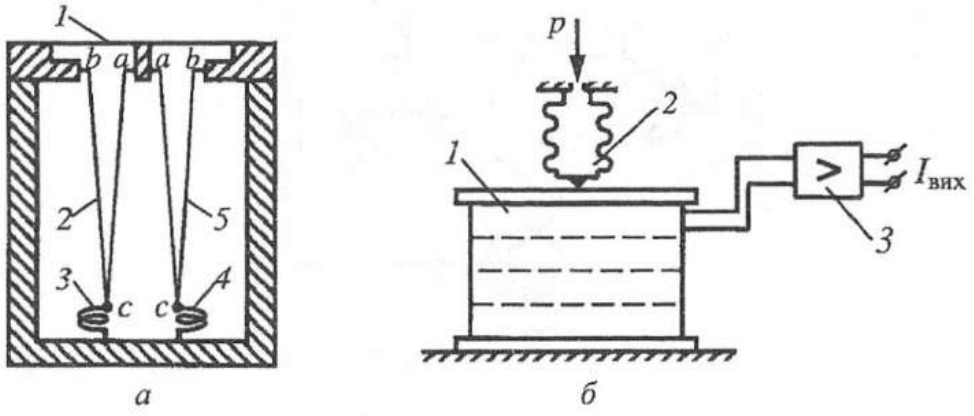


Рис. 3.14. Схема струнного (*а*) та п'єзоелектричного (*б*) вимірювачів тиску:
а: 1 – мембрана; 2, 5 – струни; 3,4 – пружини; б: 1 – п'єзоелектричний перетворювач; 2 – ЧЕ тиску; 3 – підсилювач

Струнні ПВП мають такі метрологічні характеристики: лінійність і гістерезис – від ±0,1 до ±1 % діапазону вимірювання, похибка від 0,1 до 1 % діапазону вимірювання, частотна характеристика – власна частота від 1 до 50 кГц (залежно від будови кріплення), вихідний сигнал – 10 мВ у діапазоні вимірювання. Недолік – чутливість до перевантажень і ударів.

3.4.6. П'єзоелектричні вимірювачі тиску

Їх основу складають п'єзоелектричні перетворювачі, що грунтуються на виникненні зарядів різних знаків на протилежних гранях кристалів (кварцу,

турмаліну, титанату барію тощо), стискуваних деяким зусиллям, яке є вихідним сигналом відповідного ПВП тиску.

Деформаційні ПВП тиску 1 (у цьому випадку сильфон, однак у промислових п'єзоелектричних манометрах зазвичай використовують більш компактні мембрани) перетворюють вимірюваний тиск *p* у зусилля (рис. 3,14, *б*)**.** під дією якого в п'єзоелектричному перетворювачі 2 (будову та роботу таких перетворювачів розглянуто в п. 2.9.) виникає електричний заряд, пропорційний вхідному зусиллю. Підсилювач 3 формує уніфікований вихідний сигнал, пропорційний вимірюваному тискові *p*.

П'єзоелектричні перетворювачі широко застосовують як перетворювачі швидкозмінних тисків у діапазоні 10^4,...10^7 Па та частотному діапазоні від одиниць герців до десятків кілогерців. Слід зазначити, що вимірювання динамічного тиску супроводжується здебільшого порівняно високим рівнем квазістатичного тиску, значення якого може досягати до 10 МПа. Тому суттєвою вимогою до п'єзоелектричного ПВП в цьому випадку є висока механічна міцність.

Для вимірювання тиску використовують *пітрани* – чутливі до зміни тиску п'єзотранзистори. Принципову електричну схему дифманометра з двома пітранами зображено на рис. 3.15.

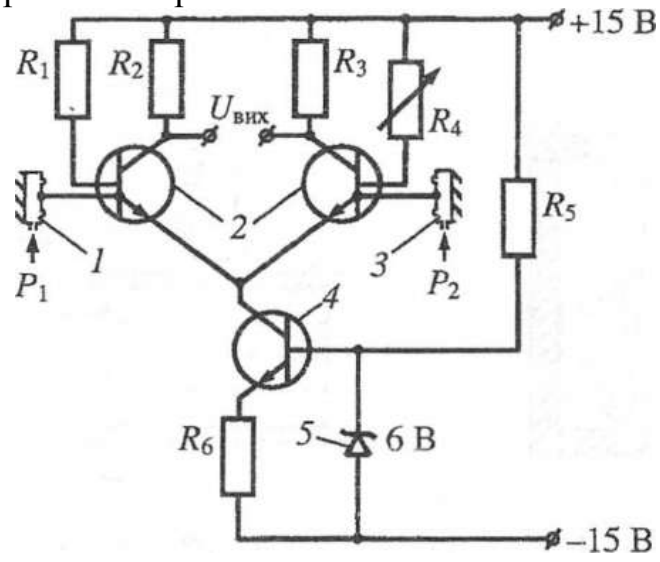


Рис. 3.15. Принципова електрична схема дифманометра з чутливими до тиску транзисторами (пітранами):

1,3 – мембранні ковпачки; 2 – пітрани; 4– транзистор; 5 – стабілітрон

Пітран являє собою площинну *npn*-структуру на кремнієвому кристалі, у якій запірний шар *емітер – база* механічно з'єднаний із поверхнею ковпачка, виконаного у вигляді мембрани, що сприймає механічні зусилля або тиски. Збільшення перепаду тисків $P_1 - P_2$, що передаються мембранами 1, 3 на запірні шари *емітер – база* пітранів *2*, пропорційно змінює $U_{вих}$. Транзистор 4 та стабілітрон 5 забезпечують стабілізацію робочої точки пітранів.

Залежно від типу п'єзотранзисторів їх чутливість становить 13...300 В/Н зосередженого навантаження; лінійний діапазон 125...1750 мм вод. ст.;

температурний коефіцієнт змінюється від 0 до ±400 мВ/°С, однак може бути знижений з використанням компенсаційних схем.

3.4.7. Манометри опору

Манометри опору використовують для вимірювання високих (понад 100 МПа) тисків; їх принцип дії грунтується на зміні опору провідника чи напівпровідника від зміни його площі перерізу, спричиненої деформувальною дією вимірюваного тиску. Найчастіше для виготовлення манометрів опору використовують манганін, який, поряд із малим температурним коефіцієнтом (2...2,5 10^{-11} $м^2/Н$), має лінійну залежність (аж до тиску 3000 МПа) приросту електричного опору ΔR від тиску p:

$$\Delta R = kRP,$$

де k – коефіцієнт зміни опору манганіну, $м^2/Н$; R – опір провідника за нульового тиску.

Конструктивно вони складаються з манганінового дроту, намотаного без натягу на циліндричне осердя з ізоляційного матеріалу. Під дією вимірюваного тиску електричний опір дроту змінюється у співвідношенні 2,33 10^{-5} Ом/МПа, а точність таких вимірювачів може досягати 0,1 %. Низька чутливість манганінового перетворювача зумовлює доцільність використання манганінових манометрів лише для вимірювання високих і надвисоких тисків. Крім металевих ЧЕ, у манометрах опору використовуються напівпровідникові. Так, кремнієві діоди з паралельно ввімкненими опорами можуть використовуватись як високочутливі вимірювачі різниці тисків за статичного тиску до 150 МПа.

3.5. Диференціальні манометри

Диференціальні манометри (дифманометри) можна використовувати для вимірювань надлишкового тиску, різниці тисків (перепаду), рівня рідини, витрат рідини або газу (в комплекті зі звужувальними пристроями). Сумісно з блоком добування кореня вони забезпечують отримання лінійної залежності між вихідним сигналом дифманометра і вимірюваною витратою.

Диференціальні манометри розрізняють за принципом дії, діапазоном вимірювань і характером відлікового пристрою (показувальні, самописні, інтегрувальні тощо). Крім того, багато з них обладнують електричними або пневматичними перетворювачами переміщення ЧЕ дифманометра у відповідний сигнал, який надходить на вторинний вимірювальний прилад (сам дифманометр може бути й безшкальним).

Граничні перепади тиску дифманометрів вибирають зі стандартного ряду: 10, 16, 25, 40, 63, 100, 250, 400, 630 Па; 1, 1,6, 2,5, 4, 6,3, 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250,400,630 кПа; 1, 1,6, 2,5, 4, 6,3 МПа.

За принципом дії дифманометри поділяють на рідинні (серед них і рідинно-механічні) та деформаційні. Усі різновиди рідинних і деформаційних дифманометрів можуть бути компенсаційними.

3.5.1. Рідинні дифманометри

У дифманометрах рідинної системи вимірюваний перепад тиску ($p_1 - p_2$) зрівноважується різницею тисків, утворюваних різницею висоти h стовпів манометричної рідини у плюсовому та мінусовому колінах. Але тільки в дифманометрах із нерухомими колінами ця висота її служить для вимірювання перепаду $p_1 - p_2$, в інших дифманометрах вимірюваний перепад тиску визначається висотою переміщення дзвона чи рухомого коліна або кутом повороту кільця.

Рідинні дифманометри високоточні й надійні (їх часто використовують як зразкові та контрольні вимірювачі), але досить інерційні, крім того, в багатьох з них як манометричну рідину застосовують ртуть; при цьому потрібно дотримуватись особливих правил техніки безпеки, що ускладнює експлуатацію таких дифманометрів.

Рідинні дифманометри складаються із двох сполучених між собою трубок або посудин, заповнених манометричною рідиною до нульової позначки шкали. Висоту стовпа манометричної рідини, а також висоту підняття однієї з посудин у приладах компенсаційного типу вимірюють візуально. Найчастіше застосовують дифманометри з однією манометричною рідиною $p_1 - p_2$ U-подібні (основні прилади) та П-подібні, але для вимірювання малих перепадів тиску існують також прилади з двома манометричними рідинами.

Багато приладів працюють за принципом U-подібної трубки (двотрубні, багатотрубні, однотрубні з нахиленою трубкою та компенсаційні дифманометри). Граничний перепад, вимірюваний двотрубними й однотрубними дифманометрами, зазвичай становить 10,6 10^4 Па (800 мм рт. ст.). Прилади з нахиленою трубкою служать для вимірювання малих перепадів тиску. Переваги рідинних дифманометрів – проста будова та висока точність. Похибка вимірювання зазвичай не перевищує ±0.5... 1 %, а із застосуванням оптичного відліку положення рівня вона може бути знижена ще в 10 разів. Найменша абсолютна похибка ±0,2 Па (±0,02 мм вод. ст.) досягається в компенсаційних мікродифманометрах. Вади рідинних дифманометрів з видимим рівнем – візуальний характер показань приладів, крихкість скляних частин конструкції та мала наочність шкали, що ускладнює відлік показань. Ці прилади застосовують як зразкові для перевірки та градуювання, а також як контрольні під час промислових випробувань і річних дослідницьких робіт. Вони переносні й не пристосовані для щитового монтажу.

Властивості манометричних рідин (густина, поверхневий натяг, коефіцієнт об'ємного розширення) значно впливають на характеристики розглянутих приладів. Густиною манометричної рідини визначається верхня границя вимірювання, коефіцієнтом об'ємного розширення β – температурна

похибка, а поверхневим натягом і капілярною сталою – похибка від впливу капілярних сил.

Найпростіший із рідинних дифманометрів з видимим рівнем (рис. 3.16, а) – це скляна U-подібна трубка, заповнена до середини манометричною рідиною (промислові варіанти таких дифманометрів виготовлюють з двох товстостінних трубок, закріплених у металевих блоках, звідси назва – *двотрубні*).

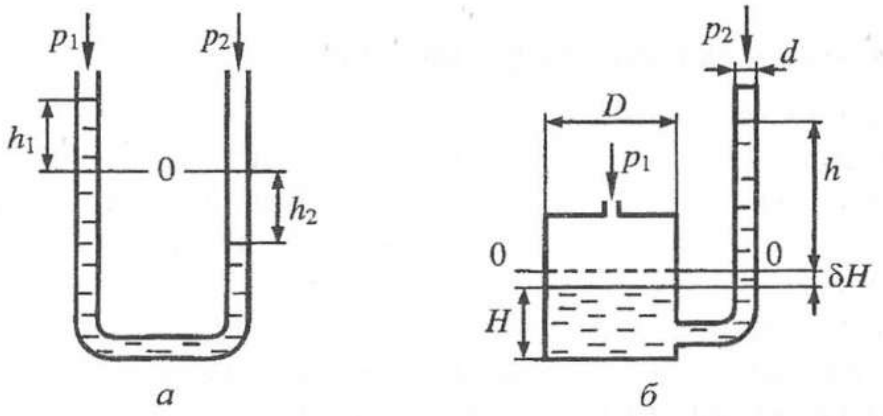


Рис. 3.16. Схеми U-подібного (*а*) та однотрубного (*б*) дифманометрів:
0-0 – нульовий рівень; D і d – діаметри чашки і трубки дифманометра

Рівняння U-подібного дифманометра має вигляд

$$\Delta p = p_1 - p_2 = pgh$$

де $h = h_1 + h_2$ – різниця рівнів манометричної рідини в колінах (трубках) дифманометра; ρ – густина манометричної рідини. Чутливість

$$S_1 = \Delta h / \Delta p = (h_1 + h_2) / [\rho g(h_1 + h_2)] = 1/\rho g.$$

У разі відліку двох рівнів у двотрубному дифманометрі подвоюється похибка від неточності відліку й подовжується процес вимірювання. Остання обставина істотна для вимірювання швидкозмінних витрат і великої кількості вимірювань. Цих вад позбавлений однотрубний дифманометр, у якому плюсову трубку замінено циліндричною посудиною великого діаметра (часто її називають чашкою, а самі дифманометри – чашковими), а відлік виконують тільки за рівнем рідини в одній трубці (рис. 3.16, *б*).

Для однотрубних дифманометрів, у яких об'єм рідини, витисненої тиском p_1 з чашки (площа поперечного перерізу F), дорівнює об'ємові рідини, що надходить у трубку (площа поперечного перерізу f тобто справджується рівність $HF=hf$, отримаємо основне рівняння

$$p_1 - p_2 = \rho g(h + H) = \rho gh(1+f / F)$$

Оскільки $F>>f$ (D= 100 мм, $d=3$ мм), то зміщенням нуля, яке дорівнює зміні рівня δH чашці, можна знехтувати. Це дозволяє під час вимірювань робити тільки один відлік рівня рідини – у трубці.

Порівняно з U-подібними дифманометрами чутливість однотрубних зменшується:

$$S_2 = 1 / [\rho g(1+f / F)],$$

але незначно, позаяк складова f / F має мізерне значення.

Для підвищення чутливості використовують рідинні мікроманометри з нахиленою трубкою (кут нахилу постійний або змінний у визначених межах).

3.5.2. Рідинно-механічні дифманометри

Дифманометри цього виду використовують для вимірювання невеликих надлишкових тисків, розрідження та різниці тисків у виробничих умовах. За конструкцією їх поділяють на поплавкові, дзвонові та кільцеві. Поплавкові дифманометри вже вийшли з ужитку, позаяк робочою рідиною в них була ртуть.

Кільцеві дифманометри (рис. 3.17) конструктивно складаються з порожнистого кільця 1 з перегородкою 2 у верхній частині, по різні боки якої за допомогою гнучких трубок підводяться тиски p_1 і p_2. Кільце 1 наполовину заповнено запірною манометричною рідиною 5. На кільце діють такі обертальні моменти: а) момент зусилля, створеного дією підведеного перепаду тиску на перегородку 2; б) момент, утворюваний дією тисків p_1 і p_2 на поверхню манометричної рідини; в) момент, який утворюється вагою стовпа h манометричної рідини; г) момент, утворюваний противагою 6.

Якщо $p_1 > p_2$, кільце повертається у напрямі годинникової стрілки навколо ножової опори 4, встановленої так, що вісь обертання зазвичай збігається з геометричним центром кільця 1. Кут повороту φ залежить від ваги противаги 6, яка створює протидійний момент.

У кільцевому дифманометрі різниця тисків $p_1 - p_2$, що діє на перегородку площею f, утворює обертальний момент $M_{об}$ відповідно до рівняння

$$M_{об} = (p_1 - p_2) f R,$$

де R – середній радіус кільця.

Під дією моменту $M_{об}$ кільце повертається за годинниковою стрілкою на кут φ доти, доки вага G противаги 6, віддаленої на відстань a від осі обертання, не створить протидійного моменту $M_п = aG\sin\varphi$, однакового з моментом $M_{об}$. Із рівності моментів $M_{об}$ та $M_п$ випливає, що

$$p_1 - p_2 = k \sin\varphi,$$

де $k = aG / (fR)$.

Оскільки це рівняння не містить густини манометричної рідини, то кут повороту φ не залежить від неї, а отже, і від температури рідини (максимальна висота піднімання запірної рідини h та її густина визначають діапазон вимірювання дифманометра, ніяк інакше манометрична рідина на роботу прилада не впливає). З конструктивних міркувань кут повороту кільця не може бути більшим за 60°, що обмежує довжину шкали за безпосереднього з'єднання кільця зі стрілкою відлікового пристрою. Для подовження шкали між стрілкою та кільцем вводять передачу, яка збільшує зміщення стрілки й одночасно вирівнює (через уведення в передавальний механізм лекальних пластин потрібного профілю) шкалу приладу.

Інші істотні переваги кільцевих дифманометрів – легкість переходу до іншого діапазону вимірювання (через зміну противаги G) та мале тертя завдяки опорі ножового типу. Але ці дифманометри потребують підвищеної уваги у процесі експлуатації, а тиски p_1 і p_2 слід підводити до них гнучкими трубками.

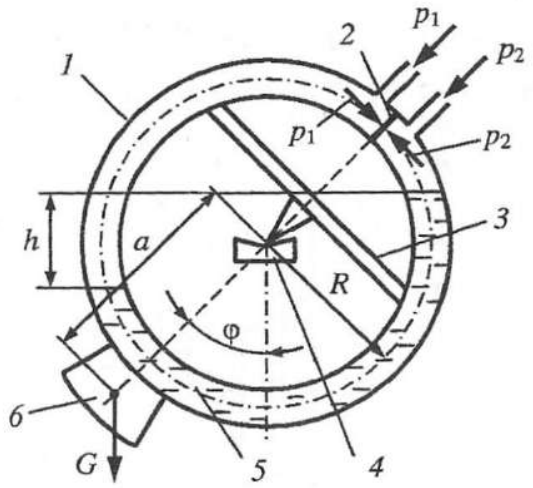


Рис. 3.17. Схема кільцевого дифманометра:
1 – порожнисте кільце; 2 – перегородка; 3 – поперечка; 4 – призмова опора; 5 – манометрична рідина; 6 – противага

Основна галузь застосування кільцевих дифманометрів – вимірювання витрати газів низького тиску за малих граничних перепадів: 250, 400, 630, 1000, 1600 Па. Тут для подачі тисків p_1 і p_2 від імпульсних трубок до дифманометра служать гумові трубки. Манометрична рідина – масло чи вода (раніше виготовлялися кільцеві дифманометри з ртутним заповненням на середній тиск до 3 МПа та високий – до 70 МПа).

Дзвонові дифманометри зазвичай мають один дзвін (рідше два, підвішених на коромислі), який частково занурений у рідину й перемішується під дією вимірюваної різниці тисків. Більший тиск p_1 зазвичай подається усередину дзвона, а тиск p_2 – зовні, але трапляються випадки, коли тиски подаються у зворотному напрямі. Якщо дзвонів два, тиск p_1 подається під один дзвін, а тиск p_2 – під другий.

Залежно від характеру протидійної сили дзвонові дифманометри можуть бути з гідравлічним, пружинним або вантажним зрівноважуванням.

У дифманометрах із пружинним зрівноважуванням протидійна сила створюється за рахунок деформації пружини 1, до якої підвішено дзвін 2 (рис. 3.18).

У дифманометрах із пружинним і вантажним зрівноважуванням стінки дзвонів тонкі й зміною гідростатичного тиску під час переміщення дзвонів тут можна знехтувати, а отже, рівняння вимірювання матиме вигляд

$$p_1 - p_2 = ch / F$$

де c – коефіцієнт жорсткості пружини; h – хід дзвона; F – площа дна дзвона.

Дзвонові дифманометри вирізняються високою чутливістю, яка тим вища, чим більша площа дна дзвона (зі збільшенням площі також зменшується похибка вимірювання ΔH; температурний коефіцієнт дзвонових дифманометрів із пружинним зрівноважуванням мало відрізняється від нуля).

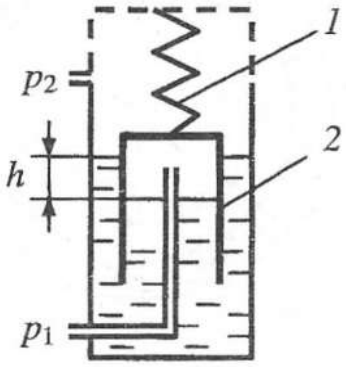


Рис. 3.18. Схема дзвонового дифманометра із пружинним зрівноважуванням:
1 – пружина; 2 – дзвін

Хід дзвона може в багато разів перевищувати різницю рівнів рідини зовні й усередині дзвона. Через це дзвонові дифманометри застосовують переважно для вимірювання невеликих перепадів тиску (зазвичай 100... 1000 Па), зокрема для вимірювання витрати газу з незначним надлишковим тиском (0,06...0,25 МПа).

Робоча рідина в дзвоновому дифманометрі не повинна поглинати вологу з газу чи мати схильність до випаровування, тому в них доцільно застосовувати різні масла (особливо парафінисті). У дзвонових дифманометрах показання передаються на відстань електричними (диференціально-трансформаторними чи феродинамічними) та пневматичними системами передавання.

3.5.3. Деформаційні дифманометри

Деформаційні дифманометри поділяють на мембранні та сильфонні. У них перепад тиску зрівноважується силами пружності мембрани, сильфона чи іншого ПЧЕ і вимірюється величиною їх переміщення. Деформаційні дифманометри мають невелику масу та габарити, а тому малоінерційні, але їх показання залежать від ступеня досконалості пружних властивостей ЧЕ (це, зокрема, нелінійність їхніх характеристик, порівняно невисока чутливість і розкид робочих характеристик мембран), а в разі недостатньої надійності запобіжних пристроїв можливе їх ушкодження через перевантаження. Відзначені вади довго стримували поширення деформаційних дифманометрів. Натепер їх майже подолано, зокрема завдяки побудові вимірювальних схем деформаційних дифманометрів за методом силового зрівноважування, і ці прилади стали широко застосовувати у виробничій практиці замість рідинних дифманометрів, особливо для середніх і великих пе-

репадів тиску. Та й за малих перепадів тиску вони можуть конкурувати із дзвоновими та кільцевими дифманометрами рідинної системи.

Дифманометри типу ДМ. Принцип дії цих дифманометрів ґрунтується на використанні залежності величини деформації ЧЕ (мембрани) від тиску, що діє на нього.

Чутливий елемент дифманометра (рис. 3.19) – це мембранний металевий блок, який складається з двох або чотирьох мембранних коробок 1 і 3, закріплених по обидва боки розділювальної подушки 2, що розділяє герметичний корпус 4 на дві вимірювальні камери: нижню – плюсову (це камера, подача тиску в яку призводить до збільшення вихідного сигналу дифманометра) та верхню – мінусову.

Кожна мембранна коробка зварена з двох мембран, профілі яких збігаються. Внутрішні порожнини мембранних коробок з'єднані між собою і заповнені дистильованою водою чи кремнійорганічною рідиною. Тиск до ЧЕ підводиться через імпульсні трубки 5 і 11, на яких установлено два запірні голчасті вентилі 6 і 8 та зрівняльний вентиль 7, що з'єднує обидві трубки. На маховички вентилів нанесено позначення: на маховичок вентиля плюсової камери – знак «+», на маховичок вентиля мінусової – «–», на маховичок зрівняльного вентиля – «0»; у разі закритих запірних і відкритого зрівняльного вентилів виставляють «0» дифманометра (для дифманометрів із пневматичним виходом – 0,02 МПа).

Під упливом різниці тисків у плюсовій і мінусовій камерах нижня коробка стискається, рідина з неї перетікає у верхню коробку, спричиняючи переміщення плунжера 9 диференціального трансформатора 10, який є проміжним передавальним перетворювачем. Вихідний сигнал диференціального трансформатора при цьому змінюється за амплітудою, а в разі переходу плунжера через нейтральне положення – і за фазою.

Деформація ЧЕ відбувається доти, доки сили, пов'язані з вимірюваним перепадом тиску, не зрівноважаться силами пружної деформації мембранних коробок. Якщо фактичний перепад тиску перевищить перепад, на який розраховано прилад, або одна з мембранних коробок перебуватиме під впливом однобічного перевантаження, коробка все ж не ушкодиться, позаяк обидві мембрани, маючи схожі профілі, складуться по всій площі, витискаючи всю рідину в другу коробку. При цьому хід мембран не вийде за межі їх пружності.

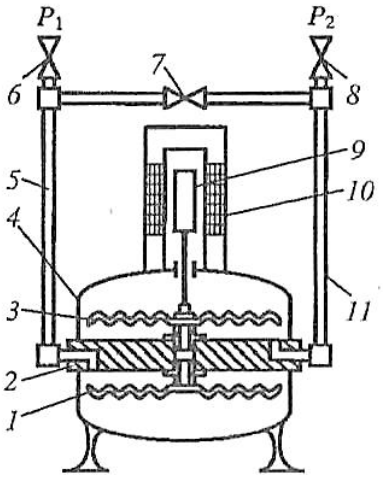


Рис. 3.19. Схема мембранного дифманометра типу ДМ:
1,3 – мембранні коробки; 2 – розділювальна подушка; 4 – герметичний корпус; 5,11 – імпульсні трубки; 6,8 – запірні вентилі; 7 – зрівняльний вентиль; 9 – плунжер; 10 – диференціальний трансформатор

Жорсткість мембранного блока в плюсовій камері у кілька разів менша від жорсткості мембранного блока, розміщеного в мінусовій. Таке конструктивне рішення дозволяє реалізувати температурну компенсацію (зменшити вплив коливань температури навколишнього повітря та вимірюваного середовища).

Вихідний сигнал дифманометра, оснащеного диференціально-трансформаторним перетворювачем, може передаватися на вторинні електронні прилади типу КВД, КСД, КСФ, на електронний регулятор або керувальну обчислювальну машину. Вихідним сигналом дифманометрів ДМ-П є уніфікований пневматичний сигнал (0,02...0,1 МПа).

Дифманометри типу ДМ виробляють для тиску до 63 МПа і на всі перепади з нормального ряду від 1,6 до 630 кПа. Вони мають клас точності 1,0 і 1,5.

Дифманометри типу ДМЕР і ДСЕР. Диференціальний манометр ДМЕР являє собою безшкальний перетворювач перепаду тиску в струмовий уніфікований сигнал 0...5 мА. Чутливим елементом дифманометра ДМЕР є блок, який складається з двох мембранних коробок, а дифманометра ДСЕР – із сильфонів, які перетворюють вимірюваний перепад тиску в зміщення магнітного плунжера. Дифманометри оснащені передавальним перетворювачем з магнітною компенсацією типу ММП двох різновидів з лінійною та квадратичною характеристиками і призначені для перетворення невеликих лінійних переміщень в електричний сигнал.

Будову дифманометра типу ДМЕР показано схематично на рис. 3.20. Чутливий елемент – блок, що складається з двох мембранних коробок 1 і 3, заповнених рідиною і розділених перегородкою 2 – такий самий, як і ЧЕ дифманометрів типу ДМ. На верхній мембранній коробці 3 закріплений немагнітний шток з магнітним осердям 10, яке перемішується усередині розділювальної трубки 7 з немагнітної нержавіючої сталі. Зовні трубки

розміщено магнітопровід 5 й інші елементи перетворювача з магнітною компенсацією. Поруч з перетворювачем міститься напівпровідниковий підсилювач 4 типу УП-МКР. На трубках, що підводять тиски, установлені два запірні вентилі 6, 9 і один зрівняльний – 8.

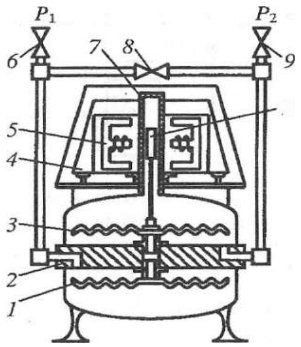


Рис. 3.20. Схема мембранного дифманометра ДМЕР:

1,3 – мембранні коробки; 2 – розділювальна подушка; 4 – напівпровідниковий підсилювач; 5 – магнітопровід; 6,9 – запірні вентилі; 7 – розділювальна трубка; 8 – зрівняльний вентиль; 10 – магнітне осердя

Структурну схему перетворювача з магнітною компенсацією зображено на рис. 3.21 (будову ММП – на рис. 2.4.). Чутливий елемент 1 перетворює вхідний параметр $П_x$ у пропорційне зміщення $X_{м.п}$ магнітного плунжера 2, який формує керувальний магнітний потік $Ф_м$. Магнітний перетворювач 3 призначено для перетворення різниці магнітних потоків $\Delta Ф = Ф_м - Ф_{з.з}$, створюваних постійним магнітом 2 і струмом зворотного зв'язку $I_{З.З}$, в електричний сигнал розузгодження U. Цей сигнал подається на вхід підсилювального пристрою, що складається з напівпровідникового підсилювача 4 та квадратура 5 і призначений для підсилення сигналу розузгодження та формування вихідного сигналу постійного струму $I_{вих} = 0...5$ мА, пропорційного вимірюваному параметрові $П_x$.

Вихідний сигнал надходить у лінію дистанційного передавання, а також в обмотку пристрою зворотного зв'язку 6, яка створює магнітний потік $Ф_{З.З}$, що компенсує дію керувального магнітного потоку $Ф_м$. Пристрій від'ємного зворотного зв'язку 6 дозволяє реалізувати відповідний закон перетворення (найбільшого поширення в технологічних вимірюваннях набули лінійний і квадратичний закони).

Вихідний сигнал U магнітного перетворювального пристрою $З$ визначається з виразу

$$U = k_1 X_{м.п} - k_2 I_{з.з}, \quad (3.1)$$

де k_1, k_2 – постійні коефіцієнти.

Вихідний струм напівпровідникового підсилювача

$$I_{вих} = k_п U. \quad (3.2)$$

де $k_п$ – коефіцієнт підсилення.

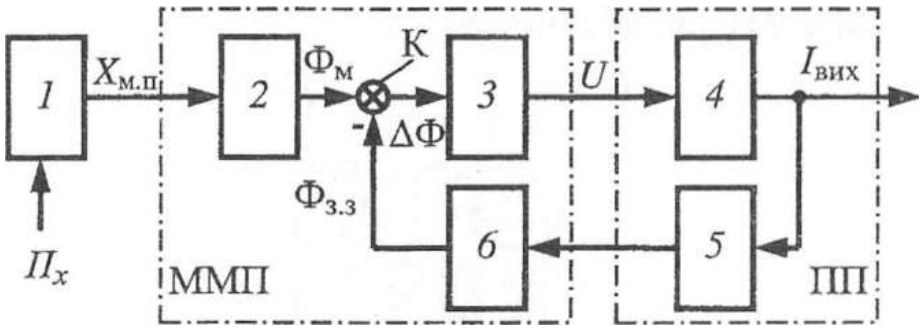


Рис. 3.21. Структурна схема перетворювача з магнітною компенсацією:
1 – ЧЕ; 2 – магнітний плунжер (постійний магніт); 3 – магнітний перетворювальний пристрій; 4 – підсилювач; 5 – квадратор; 6 – пристрій зворотного зв'язку; К – компаратор; ПП – підсилювальний пристрій

Для перетворювача з лінійною характеристикою

$$X_{\text{м.п}} = A\Pi_{\text{х}};\ I_{3.3} = k_{3.3.}I_{\text{вих}} \qquad (3.3)$$

де A – постійний коефіцієнт; $k_{3.3}$ – коефіцієнт передавання пристрою зворотного зв'язку.

Підставляючи рівняння (3.2) та (3.3) у вираз (3.1), отримаємо

$$I_{вих} = \frac{k_1}{\frac{1}{k\text{п}} + k_2 k_{3.3}} X_{\text{м.п}} \qquad (3\ 4)$$

Якщо значення коефіцієнта передавання підсилювача досить велике ($k_п \to \infty$) вираз (3.4) набуває вигляду

$$I_{вих} = \frac{k_1}{k_2 k_{3.3}} X\text{м.п} = \frac{Ak_1}{k_2 k_{3.3}} \Pi_x = K\Pi_x \qquad (3.5)$$

У разі лінійного перетворення вхідного сигналу (3.5) від'ємний зворотний зв'язок створюється резистором, через який проходить струм $I_{\text{вих}}$ (цей вид перетворення зокрема реалізується у дифманометрах-рівнемірах).

Для одержання пропорційної залежності вихідного струму передавального перетворювача від витрати середовища Q, вимірюваної за перепадом тиску Δp на звужувальному пристрої, коли

$$X_{\text{м.п}} = A\Delta P = BQ^2\ , \qquad (3.6)$$

треба застосувати нелінійний зворотний зв'язок із залежністю

$$I_{3.3} = k'_{3.3} I^2_{\text{вих}} \qquad (3.7)$$

Підставивши залежності (3.6) і (3.7) у вирази (3.1) і (3.2), одержимо (якщо $k_{\text{п}} \to \infty$):

$$I_{вих} = \sqrt{\frac{Bk_1}{k_{3.3}k_2}Q} \qquad (3.8)$$

Квадратичний закон перетворення вимірюваної величини (3.8) формується включенням у ланцюг від'ємного зворотного зв'язку нелінійних елементів або за допомогою квадратора і реалізується у дифманометрах витратомірах.

Як вторинні пристрої, що працюють у комплекті з ММП, можна застосовувати міліамперметри типів КПУ, КВУ і КСУ, електронні регулятори зі струмовим входом, мікропроцесорні контролери та кєрувальні ЕОМ.

Дифманометри типу ДМЕР (ДСЕР) мають клас точності 1,5 і розраховані на тиск до 40 МПа. Граничні перепади: 4,0; 6,3; 10,0; 16,0; 25,0 кПа і 0,04, 0,063, 0,10; 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1,0; 1,6 МПа. їх широко застосовують в енергетиці, особливо в системах керування енергоблоками великої потужності.

Дифманометри типу «Сафір». Перетворювачі різниці тисків типу «Сафір» використовують для перетворення значень рівня рідини та витрат рідини або газу, а перетворювачі гідростатичного тиску – для перетворення значень рівня рідини в уніфікований струмовий сигнал. їх можна використовувати в комплекті з блоком добування кореня для отримання лінійної залежності між вихідним сигналом і вимірюваною витратою.

У цих дифманометрах використано високоточні тензометричні перетворювачі й тому вони вирізняються з-поміж описаних вище типів промислових дифманометрів вищою точністю та невеликими габаритними розмірами.

Схему перетворювача різниці тисків типу «Сафір» показано нарис. 3.22. Тензоперетворювач 4 мембранно-важільного типу розміщено всередині основи 9 у замкненій порожнині 11, заповненій кремнійорганічною рідиною і відділеній від вимірюваного середовища металевими гофрованими мембранами 8. Мембранний тензомодуль 4 являє собою металеву мембрану, до якої зверху припаяно сапфірову пластинку з напиленими чотирма кремнієвими тензорезисторами, що утворюють плечі незрівноваженого моста.

Мембрани 5 приварені по зовнішньому контуру до основи 9 і сполучені між собою центральним штоком 12, з'єднаним тягою 6 із кінцем важеля 5, виготовленого як одне ціле з мембраною 4. Фланці 10 ущільнені прокладками 3.

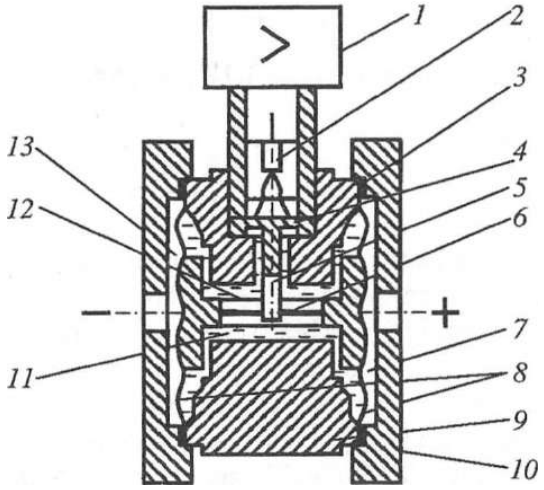


Рис. 3.22. Схема перетворювачів «Сафір» моделей 2410, 2420,2430, 2434, 2440, 2444:

1 – електронний пристрій; 2 – гермовивід; 3 – ущільнювальна прокладка; 4 - мембрана з тензоперетворювачем; 5 – важіль; 6 – тяга; 7 – камера «+»; 8 – мембрани; 9 – основа; 10 – фланець, 11 – порожнина; 12 – центральний шток; 13 – камера «–»

Вплив вимірюваної різниці тиску (більший тиск подається в камеру 7) на мембрани 8 спричиняє їх деформацію, а через згадані кінематичні елементи – деформацію мембрани тензоперетворювача 4 і відповідно зміну опору його тензорезисторів. Електричний сигнал від тензоперетворювача передається в електронний пристрій 1 провідниками через гермовивід 2.

Вимірювальний блок витримує без руйнування одностороннє перевантаження робочим надмірним тиском. Це забезпечується тим, що за такого перевантаження одна з мембран 8 лягає на відповідно профільовану поверхню основи 9, і цим припиняється її подальше деформування. Граничнодопустимий робочий надмірний тиск для перетворювачів різниці тисків типу «Сафір» становить 1,6...40 МПа (залежно від моделі перетворювача).

Перетворювачі типу «Сафір» призначені для роботи з вторинною показувальною та реєструвальною апаратурою, регуляторами, іншими пристроями автоматики та системами керування, що працюють зі стандартним вхідним сигналом 0...5, 0...20 або 4...20 мА постійного струму. Граничнодопустиме значення основної похибки $\delta_{Д0П} = \pm 0{,}25$ %.

Перетворювачі «Сафір» компактні, малогабаритні, високоточні. Серед властивих їм вад слід вирізнити можливість змінення характеристики в часі та відчутний вплив температури на показання через високе значення коефіцієнта температурного розширення кремнієорганічної рідини навіть попри вжиті заходи термокомпенсації.

Пневматичний перетворювач різниці тисків 13ДД11. Безшкальний перетворювач перепаду тиску з уніфікованим пневматичним сигналом 13ДЦ11 широко використовують у пневматичних системах передавання вимірювальної інформації: від датчиків із пневмовиходом (тиск або перепад) до пневматичних вторинних приладів, регуляторів, пневмоелектричних перетворювачів. Принцип дії перетворювача ґрунтується на пневматичній силовій компенсації.

Схему вимірювального перетворювача різниці тисків 13ДЦ11 показано на рис. 3.23. Під впливом різниці тисків, які підводяться до додатної та від'ємної камер, на двомембранному ЧЕ 1 вимірювального блока виникає зусилля, під дією якого важіль 3 повертається на невеликий кут. При цьому заслінка 4 зміщується відносно сопла 5, змінюючи тиск на виході пневмореле 6. Цей тиск надходить у сильфон зворотного зв'язку 7 і на вихід перетворювача. Пружина коректора нуля 8 служить для установлення вихідного сигналу 20 кПа без перепаду тиску на вході.

Настроюють перетворювач на заданий діапазон вимірювання переміщенням сильфона зворотного зв'язку 6 (крім параметрів самого сильфона, можливість перенастроювання обмежена також діаметром мембран вимірювального блока).

Вихідний сигнал (20...100 кПа) передається лініями зв'язку на відстань до 300 м. Похибка вимірювання не перевищує ±0,6...1 %.

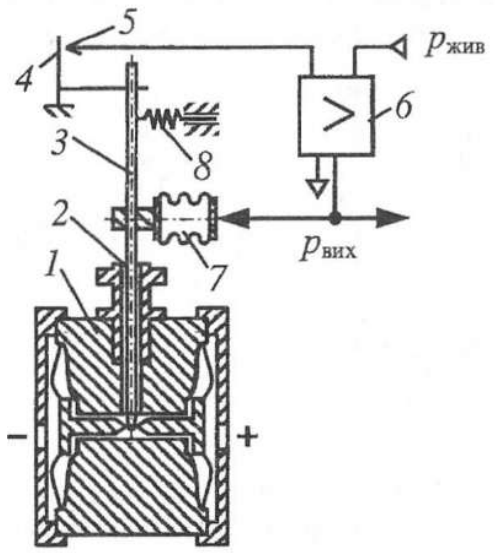


Рис. 3.23. Принципова схема перетворювача різниці тисків 13ДЦ11:
1 – двомембранний ЧЕ; 2 – гнучка мембрана; 3 – важіль; 4 – заслінка; 5 – сопло; 6 – пневмореле; 7– сильфон зворотного зв'язку; 8 – пружина коректора нуля

3.6. Пневматичні вторинні прилади

Приймачами інформації від пневматичних вимірювальних каналів і систем передавання, окрім регуляторів, перетворювачів, функціональних блоків тощо, є пневматичні вторинні прилади (показувальні та самописні) зрівноважувального перетворення. Вони не обмежені певними вимірюваними параметрами, а можуть відображати вимірювальну інформацію від усіх ПВП, що мають стандартний пневматичний сигнал (0,02...0,1 МПа), незалежно від того, які саме фізичні величини вимірюють ці ПВП. Тому їхні шкали відградуйовані не в одиницях виміру цих величин, а у відсотках.

Принцип дії вимірювального механізму пневматичних вторинних приладів ґрунтується на методі силової компенсації, за яким момент, що розвивається ЧЕ, зрівноважується моментом, створюваним пружиною зворотного зв’язку. Ці прилади входять у ДСП і забезпечують вищу точність вимірювань, ніж прилади прямої дії.

Показувальні прилади. Принципову схему приладу ПКП.1 (реєструвальні прилади цього типу мають модель ПКР) показано на рис. 3.24. Вхідний тиск стисненого повітря (вимірюваний сигнал від пневматичного ПВП) $P_{вим}$, пропорційний вимірюваній величині, надходить у сильфон 7. Зусилля, що розвивається сильфоном, передається на важіль 8, який, повертаючись навколо пружної опори, прикриває сопло 9 пропорційно величині вхідного сигналу. При цьому змінюється тиск у лінії сопла та циліндрі 6 пневматичного сервомеханізму, що зумовлює переміщення поршня 5, ущільненого манжетною мембраною 4.

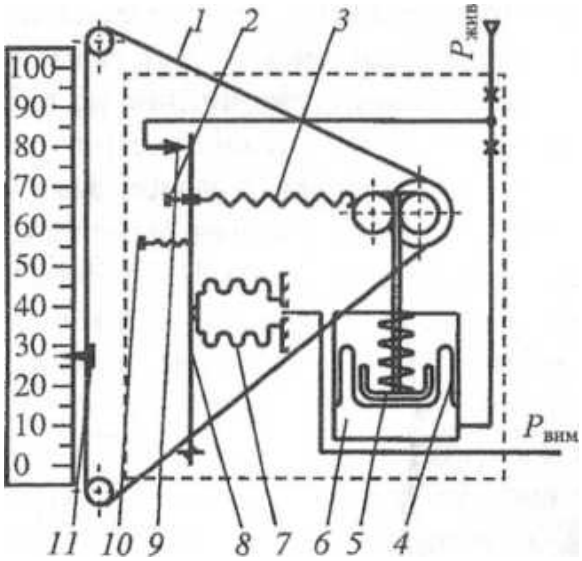


Рис.3.24. Принципова схема показу вального вторинного прикладу ПКП.1:
1 – тросик; 2,10 – гвинти; 3 – пружина зворотного зв'язку; 4 – манжетна мембрана; 5 – поршень; 6 – циліндр пневматичного сервомеханізму; 7 – сильфон; 8 – важіль; 9 – сопло; 11 – каретка зі стрілкою

Поступальний рух поршня перетворюється в обертальний рух вихідного вала, на якому жорстко закріплено шків, що за допомогою тросика 1 приводить у рух каретку зі стрілкою 11. Поршень сервомеханізму буде переміщуватися, повертаючи вихідний вал і змінюючи тим самим натяг пружини зворотного зв'язку 3 доти, поки створюваний натягом пружини момент не зрівноважить момент сильфона 7. Новому станові рівноваги відповідає нове положення стрілки приладу. На нульову відмітку стрілка приладу наводиться обертанням гвинта 10, діапазон вимірювання налагоджується обертанням гвинта 2.

Прилади ПКП мають лінійну шкалу завдовжки 100 мм; клас точності – 0,5 або 1.

Реєструвальні прилади. Схему пневматичного вторинного приладу типу ФК (ПВ) показано на рис. 3.25. Вимірюваний тиск $P_{вим}$ ЧЕ приладу сильфоном 1 створює силу *N*, під дією якої важіль 2 і закріплена на ньому заслінка *3* переміщуються відносно сопла *4*.

Таким чином, у лінії, яка з'єднує сопло з пневмосиловим елементом 11, змінюється тиск стисненого повітря, що спричинює переміщення чашоподібної мембрани пневмосилового елемента й упертого в неї важеля 10. Це зумовлює переміщення з'єднаного з ним через трос 9 і пружину зворотного зв'язку 5 важеля 2 у протилежний відносно попереднього його переміщення бік (ліворуч). Пружина 5 служить для перетворення переміщення важеля 10 у зусилля зворотного зв'язку *R*.

Важіль 2 під дією сил *N* і *R* переміщується доти, доки момент $M_{вим}$, створюваний силою *N*, не зрівноважиться моментом зворотного зв'язку $M_{з.з}$, зумовленим зусиллям *R*. У стані рівноваги, тобто, коли $M_{вим} = M_{з.з}$, переміщення важеля 2 припиняється. Значення вимірюваного тиску визначать за положенням покажчика 7 на шкалі 8 або за записом на діаграмній стрічці *6*

пером, закріпленим на покажчику. Покажемо, що в стані рівноваги переміщення Δl покажчика 7 по шкалі 8 буде пропорційним вимірюваному тискові $P_{вим}$. Для цього рівність моментів запишемо у вигляді

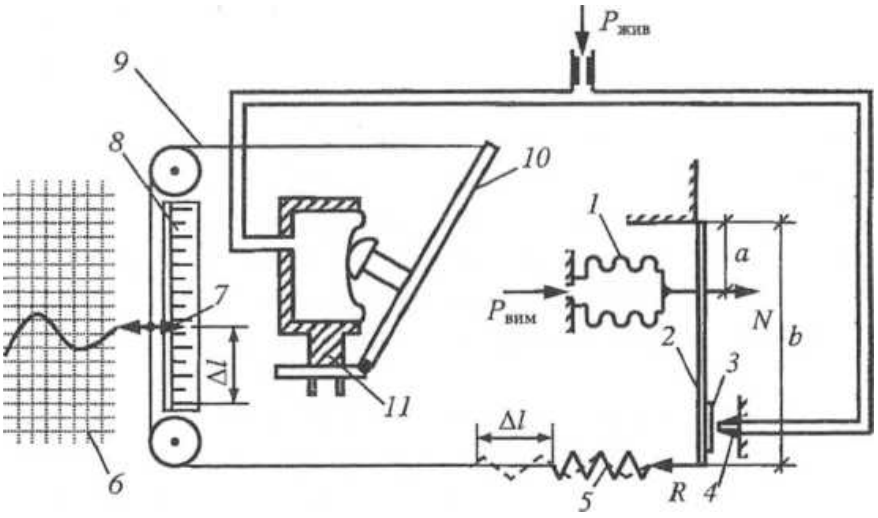


Рис. 3.25. Схема пневматичного вторинного приладу ФК0071 (ПВ4):
1 – сильфон; 2,10 – важелі; 3 – заслінка; 4 – сопло; 5 – пружина зворотного зв'язку; 6 – діаграмна стрічка; 7 – покажчик; 8 – пікала; 9 – трос; 11 – пневмосиловий елемент

$$Rb = aN \qquad (3.9)$$

де a та b - плечі прикладання сил N і R відносно осі обертання важеля *2*.

Враховуючи залежності $N = F_{еф}\ P_{вим}$, $R = c\Delta l$, перетворимо рівність (3.9) до вигляду

$$\Delta l = aF_{еф}P_{вим}/(bc) \qquad (3.10)$$

де $F_{еф}$ – ефективна площа сильфона l, c – жорсткість пружини зворотного зв'язку 5.

Оскільки всі параметри, що входять у рівняння (3.10), крім $P_{вим}$, сталі, то правомірно записати

$$\Delta l = kP_{вим}, \text{ де } k = aF_{еф} / (bc).$$

Вторинні прилади типу ФК (ПВ) мають відсоткову шкалу. Допустима основна похибка всіх шкал і діаграми становить ±1 %. Самописні прилади ФК0072 (ПВ10) додатково оснащені пневматичними станціями керування.

Контрольні запитання

1. Що характеризує тиск?
2. Які види тиску використовують у практиці технологічних вимірювань?
3. Як підрозділяються вимірювачі тиску?
4. Яка принципова відмінність деформаційних манометрів від рідинних та поршневих?

5. Що таке сильфон і для чого він призначений?

6. Як визначають ефективну площу сильфона?

7. Що являє собою трубчаста пружина?

8. Який принцип реалізує поршневий вимірювач тиску?

9. Які типові метрологічні характеристики мають первинні вимірювальні перетворювачі тиску з ДТП?

10. Який характер має залежність між ємністю та зміщенням рухомої пластини у ємнісних перетворювачах?

11. Для чого призначено вимірювальні тензоперетворювачі тиску типу «Сафір»?

12. Що таке пітран?

13. На чому грунтується принцип дії манометрів опору?

14. Для чого можна використовувати диференціальні манометри?

15. Який вигляд має рівняння U-подібного дифманометра?

16. Яка основна галузь застосування кільцевих дифманометрів?

17. На чому ґрунтується принцип дії деформаційних дифманометрів?

18. На чому ґрунтується принцип дії вимірювального механізму пневматичних вторинних приладів?

РОЗДІЛ 4

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

4.1. Фізичні основи вимірювання температури. Температурні шкали. Промислові вимірювачі температури

Однією з особливостей агропромислового виробництва є те, що діапазон зміни температури в різних процесах та на їх окремих стадіях дуже широкий. Тому досить широкий і набір існуючих методів вимірювання температур різних речовин та асортимент використовуваних засобів вимірювання.

Температура (від лат. temperatura – стан) – це фізична величина, що характеризує тепловий стан (ступінь нагрітості) тіла і є мірою його внутрішньої кінетичної енергії. Багато фізичних властивостей залежать від температури (лінійні розміри твердих тіл, твердість, пластичність, модуль пружності, в'язкість, густина, електропровідність, надпровідність тощо).

Виміряти температуру речовини безпосередньо так, як наприклад вимірюють інші величини через порівняння їх зі зразками (довжину, масу, об'єм), не можна, оскільки неможливо створити еталон одиниці температури. Вимірювати температуру можна лише непрямими вимірюваннями, ґрунтуючись на залежності від температури таких фізичних властивостей тіл, які піддаються безпосередньому вимірюванню. Ці властивості тіл називають *термометричними.*

Для переходу до кількісного вираження температури необхідно встановити шкалу температури (температурна шкала – конкретний функціональний числовий зв'язок температури зі значеннями вимірюваної термометричної властивості), тобто обрати початок відліку (нуль пікали) та одиницю виміру температурного інтервалу (градус).

Перші шкали появилися у XVIII столітті. Для їх побудови обирали дві опорні (реперні) точки t_1 і t_2, які являють собою легко та досить точно відтворювані стани термометричного тіла, наприклад, температури фазової рівноваги (кипіння, плавлення, затвердіння) чистих речовин. Потім отриманий температурний інтервал $t_2 - t_1$ поділяли на певну кількість рівних частин n, а значення $(t_2 - t_1)$ In брали за одиницю температури – градус (лат. gradus – крок, ступінь).

Ґ. Фаренгейт (1724), Р. Реомюр (1730) та А. Цельсій (1742) для побудови шкал за реперні точки брали точки плавлення льоду (t_1) та кипіння води (t_2). Але оскільки їм присвоювали різні числові значення температури (у Фаренгейта 32 та 212 градусів, у Реомюра 0 і 80 градусів, у Цельсія 0 та 100 градусів відповідно), а відтак ділили один і той же температурний діапазон на різну кількість однакових відрізків (у Реомюра – 80, у Цельсія – 100, у Фаренгейта – 180), то отримали різні шкали, в яких одиниці виміру мають таке співвідношення:

$$t, °C = \frac{5}{4t}, °R = \left(\frac{5}{9}\right)(t, °F - 32)$$

Для побудови цих шкал було використано лінійну залежність між об'ємним розширенням рідини і температури, тобто

$$\mathrm{dt} = \mathrm{kdV} \tag{4.1}$$

де k – коефіцієнт пропорційності (відповідає відносному температурному коефіцієнтові об'ємного розширення).

Після інтегрування вираз (4.1) набув вигляду

$$t = kV + A \tag{4.2}$$

де A– стала інтегрування.

Для визначення k та A використовують дві обрані (сталі) температури t_1 і t_2 (їх називають температурними реперами). Якщо припустити, що за температури t_1 рідина має об'єм V_1, а за температури t_2 – об'єм V_2, то

$$t_1 = kV_1 + A \tag{4.3}$$

$$t_2 = kV_2 + A \tag{4.4}$$

Віднімаючи рівняння (4.3) від виразів (4.2) та (4.4), отримаємо

$$t - t_1 = k(V - V_1) \tag{4.5}$$

$$\mathrm{t_2 - t_1 = k(V_2 - V_1)} \tag{4.6}$$

Поділивши рівняння (4.5) на (4.6), після перетворень остаточно маємо

$$t = t_1 + \frac{V - V_1}{V_2 - V_1}(t_2 - t_1) \tag{4.7}$$

де t_1, t_2 - температури танення льоду та кипіння води відповідно за нормального тиску і g = 9,80665 м/с^2; V_2 та V_1 – об'єми рідин, які відповідають температурам t_2 і t_1, V- об'єм рідини за температури t.

Рівняння (4.7) називають **рівнянням шкали температур**.

У природі немає рідин з лінійною залежністю між коефіцієнтом об'ємного розширення та їх температурою, до того ж ця нелінійність у різних термометричних речовин різна, тому показання таких термометрів залежать від природи термометричного тіла (ртуті, спирту, гасу і т. ін.). Пізніше було виявлено, що показання термометрів, у яких використовуються різні термометричні тіла з однією й тією ж термометричною властивістю і які мають рівномірну шкалу, збігаються лише в реперних точках. Це особливо помітно в разі вимірювання температур, які віддалені від основного інтервалу t_2 - t_1. Тому такі шкали називають умовними, а масштаби цих шкал – умовними градусами.

Проблема створення абсолютної температурної шкали (шкали Фаренгейта, Реомюра та Цельсія, по суті, відносні, оскільки їх розробники присвоювали їм «нульові» відмітки, що жодним чином не стосувалися абсолютного нуля температури), яка не залежить від термометричних властивостей речовин, була вирішена у 1848 році В. Кельвіном. Термодинамічну

шкалу температур Кельвіна побудовано на підставі другого закону термодинаміки: ККД теплової машини, яка працює за оборотним циклом Карно, визначається лише температурою нагрівника $T_н$ та холодильника $T_х$ і не залежить від властивостей робочої речовини. Кельвін запропонував використати рівняння $T_н/T_х = Q_н/Q_х$, тут $Q_н$, та $Q_х$ кількість тепла, отримана робочою речовиною від нагрівника та віддана холодильникові.

Цикл Карно – оборотний коловий процес, який складається з двох ізотермічних і двох адіабатичних процесів, що поперемінно чередуються між собою (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Цикл Карно

Робоча речовина за абсолютної температури T_1 спочатку розширюється, поглинаючи тепло Q_1 (ізотерма 1-2), а відтак охолоджується до абсолютної температури T_2 (адіабата 2-3). Зі стисканням робоча речовина за температури T_2 віддає теплоту Q_2 (ізотерма 3-4) і повертається до початкового стану за температури T_1 (адіабата 4-1). За один цикл виконується робота $A = Q_1 - Q_2 = (1 - T_2 / T_1)Q_1$, яка чисельно дорівнює площі, обмеженій відрізками ізотерм і адіабат. Коефіцієнт корисної дії $\eta = (T_1 - T_2) / T_1$ (уперше ввів Н. Карно в 1824 р.).

За першу реперну точку термодинамічної шкали було обрано потрійну точку води (рівновага води в твердій, рідкій та газоподібній фазах), яка відтворюється з похибкою не більше 0,0001·К, а її температура має становити 273,16 К. Друга реперна точка – абсолютний нуль. Оскільки цикл Карно експериментально не реалізується, то й реалізація шкали Кельвіна в «чистому» вигляді – з використанням теплової машини, яка працює за оборотним циклом Карно, як термометра – практично нездійсненна.

Термодинамічна температура еквівалентна газотермічній, використовуваній у рівняннях, які описують закони ідеальних газів. Як відомо, деякі реальні гази (водень, гелій, неон, азот) у широкому діапазоні температур за своїми властивостями близькі до ідеальних газів. Так, шкала водневого термометра (з урахуванням поправки на відхилення властивостей реального газу від ідеального) являє собою майже термодинамічну шкалу.

Газові термометри (вони бувають трьох різновидів: постійного тиску, постійного об’єму та постійної температури) - дуже точні прилади для вимірювання температури, але працювати з ними дуже складно, а діапазон вимірювання відносно вузький. Вони не набули широкого практичного поширення. Тому виникла потреба в розробленні такої практичної температурної шкали, яка б, збігаючись з термодинамічною, водночас дозволяла розширити температурний діапазон, була зручною для вимірювання та забезпечувала надійність відтворення.

Відповідно до системи СІ для вимірювання температури використовують абсолютну термодинамічну шкалу Кельвіна. Градуси температури по цій шкалі відраховують від абсолютного нуля, що нижче від точки танення льоду на 273,16 К. Поряд з цим 1990 року прийнято Міжнародну температурну шкалу МТШ-90 (їй передували Міжнародна температурна шкала, введена 1927 року, та перехідні міжнародні практичні шкали МПТШ-48, МПТШ-68, МПТШ-76, введені відповідно 1948, 1968 та 1976 р.), в основу якої покладено шкалу Цельсія, але на відміну від неї міжнародна шкала спирається на значно більшу кількість температурних реперів (табл. 4.1).

Більшість сучасних термометрів мають шкалу в градусах Цельсія, але для технічних розрахунків частіше застосовують градуси Кельвіна (*кельвін* - одиниця термодинамічної температури, що дорівнює 1/273,16 термодинамічної температури потрійної точки води). Значення температури в градусах Кельвіна на 273,16 більше від її значення у градусах Цельсія (в інженерних розрахунках інколи припускають 0 °С за 273 К):

$$T(K) = t(°C) + 273{,}16$$

Класифікація промислових вимірювачів температури. У різних галузях науки і техніки використовують дуже багато принципів та засобів вимірювання температури. Найбільш поширені промислові засоби вимірювання температури, поділені за видом використовуваної термометричної властивості, наведено в табл. 4.2. Легко бачити, що перші чотири групи засобів вимірювання температури реалізують контактні методи вимірювання, п’ята – безконтактні.

При контактному методі вимірювання вимірювальний перетворювач (давач) температури контактує з об'єктом вимірювання і набуває його температури. Застосування контактного методу обмежене жаростійкістю і хімічною стійкістю матеріалу давача температури.

У контактних вимірювальних перетворювачах температури використовують три групи термочутливих елементів: термоелементи розширення, в яких зміна температури перетвориться в розширення твердих тіл, рідин або газів; манометричні термосистеми, дія яких заснована на залежності тиску речовини в замкнутому об'ємі від температури; перетворювачі температури в зміну електричних параметрів (опір, ЕРС і т. д.).

Таблиця 4.1.

Температурні репери Міжнародної температурної шкали МТШ-90

Речовина, стан рівноваги	Температура	
	°С	К
H_2, птр. т. водню	- 259,3467	13,8033
Ne, птр. т. неону	- 248,5939	24,5561
$()_2$, птр. т. кисню	- 218,7916	54,3584
Ar, птр. т. аргону	- 189,3442	83,8058
Hд, птр. т. ртуті	- 38,8344	234,3156
H_2O, птр. т. води	0,01	273,16
Ga, т. пл. галію	29,7646	302,9146
In, т. тв. індію	156,5985	429,7485
Sn, т. тв. олова	231,928	505,078
Zn, т. тв. цинку	419,527	692,677
Al, т. тв. алюмінію	660,323	933,473
Ag, т. тв. срібла	961,78	1234,93
Au, т. тв. золота	1064,18	1337,33
Cu, т. тв. міді	1084,62	1357,77

Умовні позначення: птр. т. − потрійна точка; т. пл. − точка плавлення; т. тв. − точка тверднення**.**

До безконтактних методів вимірювання температури слід віднести радіохвильові, які впродовж останніх 25-30 років завдяки появі високочутливих радіометричних систем та пристроїв надвисокочастотного (НВЧ) діапазону набули істотного поширення. Втім, радіохвильові методи вимірювання температури та апаратуру, яка їх реалізує, поки що рідше використовують у промисловості та сільському господарстві, оскільки подібна апаратура досить складна і дорога. Водночас НВЧ-термометрія перспективна в наукових дослідженнях фізичних тіл та біологічних об’єктів, що пояснюється високою чутливістю та можливістю безконтактної реєстрації інформації про температуру об’єкта дослідження.

Той чи той метод вимірювань вибирають за низкою чинників, зокрема за значеннями вимірюваних температур, агресивністю досліджуваного середовища та динамічними його характеристиками, а також потрібною чутливістю і точністю вимірювання.

Таблиця 4.2.

Промислові засоби вимірювання температури

Гру-па	Термометрична властивість	Найменування засобу вимірювання	Діапазон ви-мірювання, °С
1	Зміна об’єму рідини чи лінійних розмірів твердих тіл	Термометри розширення: рідинні,	-30... 500
		біметалеві	-150.. .700
2	Зміна тиску робочої речовини за постійного об’єму речовини	Манометричні термометри: рідинні	-150... 600
		газові,	-150... 600
		конденсаційні	-50... 350
3	Зміна термо-ЕРС	Термоелектричні перетворювачі (ТП)	-200... 2200
4	Зміна електричного опору	Термоперетворювачі опору (ТО): металеві	-260... 1100
		напівпровідникові	-240... 300.
5	Теплове випромінювання: зміна інтенсивності монохроматичного випромінювання нагрітого тіла	Пірометри випромінювання: квазімонохроматичні (оптичні)	700... 6000
	зміна розподілу енергії в спектрі теплового випромінювання	спектрального відношення (колірні)	1400... 2800
	зміна потужності випромінювання нагрітого тіла	радіаційні	50... 3500

4.2. Термометри розширення

Залежно від виду термометричних речовин, використовуваних у приладах, термометри розширення розподіляють на рідинні та механічні. Термометри розширення прості за конструкцією, дешеві і мають достатню для практичних вимірювань точність. У зв’язку з обмеженими функціональними можливостями їх майже не використовують у системах автоматичного керування. Вади цих термометрів – значна теплова інерція та неможливість реєструвати й передавати вимірювальну інформацію на відстань.

4.2.1. Рідинні та механічні термометри

Рідинні скляні термометри. Такі термометри використовують здебільшого для візуального контролю температури в промислових умовах та лабораторній практиці в межах мінус 30... +500 °С (вироблені у 80-х - 90-х роках - до +750 °С) (рис. 4.2). Для вимірювання температур до 1000 °С використовують спеціальні сплави, наприклад сплав талію, а резервуар термометра виготовляють із кварцового скла.

Принцип дії термометра засновано на відмінності коефіцієнтів об'ємного розширення жидкості і матеріалу оболонки термометра. Таким чином, свідчення рідинного термометра залежать не тільки від зміни об'єму рідині, но і від зміни об'єму резервуару, в якому знаходиться рідина. Теплове розширення рідини характеризується середнім коефіцієнтом об'ємного розширення, значення якого визначається наступним співвідношенням:

$$\beta t_1 t_2 = \frac{Vt_2 - Vt_1}{(t_2 - t_1)V_0} \text{ 1/град.},$$

де Vt_1 і Vt_2 – об'єм рідини при температурах t_1 і t_2,

V_0 – об'єм тієї ж рідини при 0°С.

Свідчення рідинного термометра прийнято характеризувати коефіцієнтом розширення рідини в склі, визначуваним рівнянням

$$\beta t_1 t_2 = \beta' t_1 t_2 - \beta'' t_1 t_2$$

де $\beta' t_1 t_2$ – температурний коефіцієнт розширення рідини на інтервалі температур $t_2 - t_1$, $\beta'' t_1 t_2$ – температурний коефіцієнт розширення скла в тому ж інтервалі температур.

За конструктивним виконанням їх поділяють на такі:

паличкові термометри мають товстостінний капіляр із зовнішнім діаметром 6-8 мм, нижній кінець якого утворює резервуар для рідини. Верхній кінець запаяний. Шкала у цих термометрів наноситься безпосередньо на зовнішній поверхні капіляра;

термометри з вкладеною шкалою мають тонкостінний капіляр з розширеним резервуаром для ртуті. Шкалу наносять не на капіляр, а на пластинку з молочного скла. Капіляр і пластинка поміщені в захисну скляну оболонку, прикріплену до резервуару термометра. Все це разом поміщено в захисну скляну оболонку, припаяну до скляного резервуара циліндричної форми.

Для заповнення таких термометрів можна використовувати різні рідини: ртуть, толуол, етиловий спирт, гас, петролейний ефір, пентан.

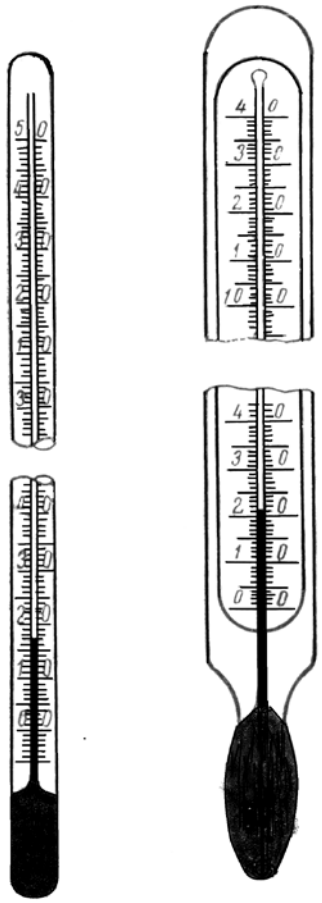
Найбільшого поширення набули ртутні скляні термометри. Ртуть не змочує скло, майже не окислюється, легко виходить в хімічно чистому вигляді і має значний інтервал між точкою плавлення (–38,86°) і точкою кипіння (356,7°). Крім того, коефіцієнт розширення ртуті мало змінюється при зміні температури, унаслідок чого шкала ртутного термометра приблизно до 200° практично лінійна.

До недоліків ртуті слід віднести порівняно невеликий температурний коефіцієнт розширення. Коефіцієнт розширення ртуті β'0-100=$18 \cdot 10^{-5}$ 1/град., а середній коефіцієнт розширення ртуті в скляній оболонці β0-100 = $18 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-5} = 16 \cdot 10^{-5}$ 1/град.

Термометри з органічними рідинами із-за ряду недоліків знаходять обмежене застосування (тільки для вимірювання низьких температур).

Отримання органічних рідин в чистому вигляді скрутно, тому відтворюваність їх властивостей недостатня. Крім того, теплоємність

органічних рідин в 10-15 разів вища, ніж ртуть, що викликає значну інерційність заповнених ними термометрів. Органічні рідини змочують скло, що викликає додаткову погрішність вимірювання при швидкому пониженні температури із-за прилипання рідини до стінок капіляра. Зі всіх термометрів, заповнених органічними рідинами, найбільшого поширення набули спиртні термометри.



а *б*

Рис. 4.2. Рідинні скляні термометри:
а – паличковий, *б* – з вкладеною шкалою.

При користуванні ртутним термометром нижчою межею вимірювання є температура –30°, вищим +500°. Для підвищення верхньої межі вимірювання до 700° простір над ртуттю в капілярі заповнюють азотом при тиску близько 20 кг/см2. При заміні скла кварцем і підвищенні тиску азоту в капілярі до 70 кг/см2 межу вимірювання можна підвищити до 750°.

Термометри з верхньою межею шкали нижче 100° С газом не заповнюються.

Залежно від призначення ртутні скляні термометри підрозділяються на зразкові (1-го і 2-го розрядів), лабораторні і технічні. Зразкові термометри 1-го розряду виготовляються тільки паличкового типу, а зразкові 2-го розряду і лабораторні – паличкового типу або з вкладеною шкалою. Міжнародну стоградусну шкалу на зразкові термометри 1-го розряду наносять за

допомогою еталонного платинового термометра опору. По зразкових термометрах 1-го розряду наносять шкали на зразкові термометри 2-го розряду, а по останніх виготовляють шкали лабораторних і технічних ртутних термометрів. І в залежності від призначення лабораторні ртутні термометри виготовляють з різними межами шкал. Технічні термометри виготовляють прямими чи загнутими під кутом 90° і лише зі вкладеною шкалою, довжина нижньої частини термометра 63... 1000 мм. На відміну від лабораторних вони мають резервуар більшого об'єму і капіляр більшого діаметру, що робить градусні ділення більшими, а стовпчик ртуті помітнішим. Для захисту від механічних пошкоджень їх укладають у металевий корпус. Загальна вада таких термометрів – складність організації неперервного вихідного сигналу, тому їх не використовують у системах керування. Винятком є ртутні електроконтактні термометри розширення, які спрацьовують у разі досягнення ртутним стовпчиком певної температурної відмітки. використовувані для сигналізації про порушення заданого температурного режиму (наприклад, для сигналізації про температуру масла підшипників компресорів) і як датчики в простих схемах автоматичного регулювання температури.

При точних вимірюваннях температури ртутними термометрами необхідно вводити поправку на виступаючий стовпчик, якщо термометр не може бути повністю занурений в вимірюване середовище.

Поправка на виступаючий стовпчик. Покази скляного ртутного термометра залежать від глибини занурення його у вимірюване середовище. При вимірюванні температури термометр слід занурювати на ту ж глибину при якій проводили градуювання (глибина занурення при градуюванні зазвичай пишеться на термометрі).

Скляні ртутні термометри градуюють або при повному зануренні, або із зануренням тільки нижньої частини. Якщо термометр, градуйований при повному зануренні, за умовами експлуатації не може бути повністю занурений у вимірюване середовище, то необхідно вносити поправку на виступаючий стовпчик.

Поправка обчислюється за формулою

$$\Delta t = n\beta_{t_1 t_2}(t_2 - t_1)$$

де n – число градусів на промовцеві ртутному стовпчику; β - коефіцієнт видимого розширення рідини в склі (для ртуті 0,00016, для спирту 0,001); t_1 – температура, що показується термометром; t_2 – середня температура виступаючого стовпчика, зміряна допоміжним термометром, резервуар якого прикріплений до середини виступаючого стовпчика основного термометра. Якщо температура виступаючого стовпчика нижче вимірюваною, то поправка М має позитивний знак, а якщо вище – негативний. Помилки, викликані виступаючим стовпчиком, можуть досягати значної величини, і нехтувати ними не слідує.

Зсув нульової крапки. Скло відноситься до матеріалів, що володіє значною термічною післядією. Це явище виявляється в тому, що при

охолоджуванні після нагріву резервуар і капіляр не відразу приймають первинний об'єм і внаслідок цього відбувається зміна нульового положення шкали. Часове зміщення нульової шкали (депресія) у термометрів не повинно перевищувати 0,1° при нагріванні на кожні 100°. Якщо депресія перевищує вказану величину, то термометр бракується. Тому при користуванні термометром рекомендується періодично повіряти нульову точку шкали.

Перед перевіркою термометр має бути нагрітий до температури, що відповідає максимальному значенню його шкали.

Якщо при перевірці виявиться зсув нульової крапки проти вказаного в свідоцтві, то необхідно внести поправку, рівну різності положень нульової крапки, вказаної в свідоцтві.

Поправки на виступаючий стовпчик і на зсув нульової точки застосовуються зазвичай в лабораторних термометрах, вживаних при точних вимірюваннях.

Ртутні скляні термометри досить широко застосовуються в лабораторній і виробничій практиці унаслідок простоти використання і монтажу, дешевизни і високої точних показів. Найголовнішими їх недоліками є неможливість реєстрації і передачі свідчень на відстань, теплова інерція, недостатня чіткість і наочність.

При відліку свідчень необхідне правильне розташування щодо шкали. Щоб уникнути паралакса при відліку, спостерігач повинен знаходитися на рівні меніска стовпчика.

Механічні термометри. Їх застосовують як для вимірювання, так і для регулювання (сигналізації) температури. Залежно від конструкції ЧЕ розрізняють дилатометричні та біметалеві термометри. Для вимірювання температури дилатометричними термометрами використовують різницю між абсолютними лінійними подовженнями двох стрижнів, виготовлених з різних матеріалів.

Біметалевий термометр складається з двох спаяних поміж собою та зігнутих металевих пластинок з різними коефіцієнтами лінійного розширення. Унаслідок зміни температури в обох конструкціях створюється зусилля пружної деформації, а переміщення, що виникає при цьому, стає пропорційним величині зміни температури. Біметалеві термометри останнім часом набули широкого застосування, оскільки вони для вимірювання не потребують живлення зовнішньої енергії.

Вимірювальні перетворювачі температури з біметалевими термоелементами. Принцип дії вимірювальних перетворювачів температури засновано на властивості металів змінювати свої лінійні розміри при зміні температури.

Подовження металевого стержня при зміні температури розраховується за рівнянням:

$$\Delta l = \alpha l \Delta \Theta, \tag{4.8}$$

або

$$l_T = l_0(1 + \alpha\Theta), \tag{4.9}$$

де l_0, l_T − відповідно довжина стержня в початковому стані при температурі 0 °С та при температурі Θ, α − коефіцієнт лінійного температурного розширення стержня. Коефіцієнт лінійного температурного розширення в тій чи іншій мірі (залежно від матеріалу) залежить від температури контрольованого середовища, тобто непостійний: $\alpha = f(\Theta)$.

Термоперетворювачі з біметалевими чутливими елементами. Термочутливий елемент такого перетворювача вироблено з двох металевих пластинок (рис. 4.3). Пластинки виконано з різнорідних металів. Метали мають сильно відрізняючи температурні коефіцієнти лінійного розширення. Металеві пластинки жорстко з'єднані між собою.

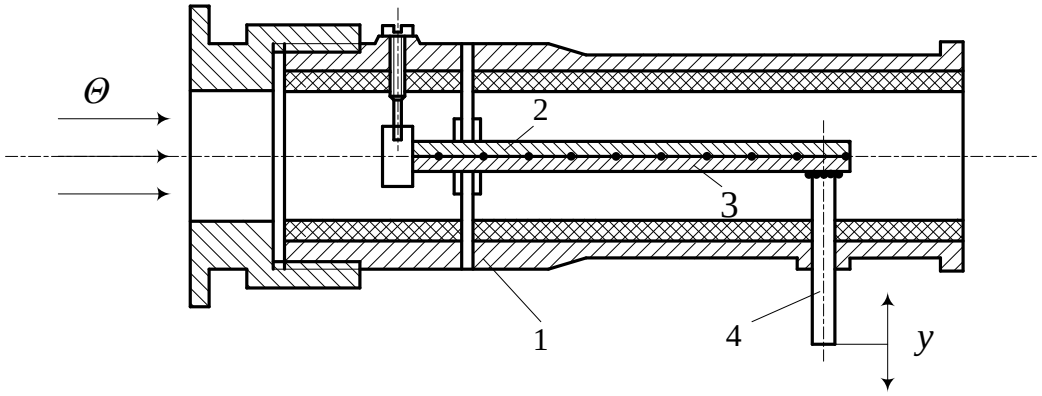


Рис. 4.3. Термоперетворювач з біметалевим чутливим елементом:
1 − корпус; 2, 3 − металеві пластинки (термочутливий біметалевий елемент); 4 − шток; Θ − вимірювана температура; y − переміщення штоку

При дії на термочутливий біметалевий елемент перетворювача температурного поля пластинки подовжуються неоднаково. А в зв'язку з тим, що вони жорстко з'єднані між собою, відбувається вигин пластини в сторону пластинки з меншим температурним коефіцієнтом лінійного розширювання. Це викликає переміщення вільного кінця, а разом з ним і штоку 4. Таким чином, вхідним сигналом біметалевого перетворювача є температура Θ середовища, в якому він розташовано, а вихідним − переміщення y вільного кінця зі штоком 4.

Переміщення y вільного кінця при нагріванні буде лінійно залежить від температури навколишнього середовища

$$y = k\Theta, \tag{4.10}$$

де $k = k_1 \frac{l}{\delta}$, k_1 − коефіцієнт пропорційності, що залежить від властивостей матеріалів і товщини біметалевої пластини; l − довжина біметалевої пластини; δ − товщина біметалевої пластини.

Величину k називають коефіцієнтом передачі термобіметалевого перетворювача. Для термочутливого елементу товщиною 0,001 м і довжиною 0,1 м, виготовленого з інвару і немагнітної сталі, переміщення вільного кінця

складає $(1…1,5)\cdot10^{-4}$ м/град. Діапазон вимірюваних температур − 60... +450 °С.

Переваги біметалічних термоперетворювачів – простота виготовлення, механічна міцність, можливість вбудовування в системи автоматики і телемеханіки. Недоліки – низька чутливість, прояв «втоми» металів і звідси – необхідність частої перевірки і калібрування за еталонними термоперетворювачами.

Пристрій, що працює за принципом біметалічного термоперетворювача, використовується в регуляторах ступеня нагріву підошви праски. У нім біметалічна пластинка є електричним контактом. При нагріванні до заданої температури пластинка відгинається і розмикає електричний ланцюг – нагрів праски припиняється. При охолоджуванні пластинка знову замикає ланцюг підтримуючи температуру підошви заданої. Температуру розмикання ланцюга можна регулювати за допомогою гвинта, що знаходиться під ручкою праски.

Термоперетворювачі з дилатометричними чутливими елементами.

Термоперетворювач з дилатометричним чутливим елементом (рис. 4.4) містить стакан 2 і стрижень 3, які змонтовано на корпусі 1. Стакан 2 і стрижень 3 виконано із матеріалу з різними температурними коефіцієнтами лінійного розширювання. Стрижень виконано з кварцу, фарфору або з іншого матеріалу, маючого малий температурний коефіцієнт лінійного розширювання. Стрижень одним кінцем закріплено до стакану, а другий кінець вільний. Цей кінець з'єднується з контактною групою будь-якого елементу керуючого пристрою. Стакан і стрижень утворюють чутливий елемент термоперетворювача.

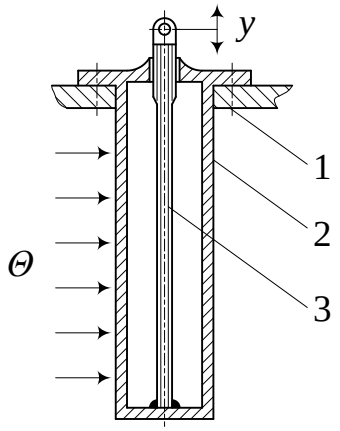


Рис. 4.4. Термоперетворювач з дилатометричним чутливим елементом:
1 − корпус; 2 − стакан; 3 − стрижень; Θ − вимірювана температура; y − переміщення стрижня

При зміні температури середовища Θ, в якому розташовано дилатометричний термоперетворювач, здійснюється переміщення y вільного кінця стрижня 3. Таким чином, вхідним сигналом термоперетворювача є вимірю-

вана температура Θ середовища, а вихідним − переміщення y вільного кінця стержню 3.

Діапазон вимірюваних температур такими давачами складає −40... +180 °С. За динамічними властивостями ці давачі є інерційні ланки першого порядку. Вони досить тривало прогріваються, тобто володіють тепловою інерцією з постійною часу рівною 2…6 с. Погрішність перетворення цих давачів складає 1…5 %.

4.2.2. Електроконтактні технічні термометри

Ртутні електроконтактні термометри з упаяними і рухомими контактами застосовують в системах автоматичного керування для сигналізації та регулювання температури в лабораторних і промислових умовах, у колах постійного та змінного струмів. Стовпчик ртуті є одним контактом, а дріт у капілярі – другим контактом електричного вимикача.

Електроконтактні термометри виготовляють із постійними впаяними контактами (при цьому точка перемикання фіксується й не може бути змінена згодом) або з одним рухомим контактом, який можна перемішувати всередині капіляра за допомогою спеціального пристрою (магнітної муфти), і другим нерухомим контактом, упаяним у капіляр термометра. Замикання (розмикання) електричного кола між контактами в обох випадках відбувається внаслідок розширення (стискання) ртуті під час нагрівання (охолодження) нижньої частини термометра. Для захисту контактів простір над ртуттю в капілярі заповнюють захисним газом (переважно воднем, заздалегідь позбавленим вологи й кисню).

Ртутні вимірювальні перетворювачі температури з упаяними контактами або термосигналізатори 3, 4 (рис. 4.5) застосовують в системах сигналізації фіксованих значень температури.

Будову електроконтактного ртутного термометра з (магнітним переставлянням контакту) рухомими контактами показано на рис. 4.6. Він має дві шкали – верхню та нижню. Верхню допоміжну шкалу нанесено на шкальну пластину вздовж овальної скляної трубки 4, припаяної до капіляра 10. Покажчиком цієї шкали для налагодження термометра є овальна гайка 5, яка під час обертання мікрогвинта 6 може перемішуватися по ньому вверх або вниз усередині овальної скляної трубки. Верхній кінець мікрогвинта жорстко з’єднаний зі сталевим циліндричним якорем 1, а нижній його кінець опирається на підп’ятник 7. Обертання верхнього ковпачка із закріпленим у ньому постійним магнітом 2 приводить в обертання циліндричний якір 1, закріплений на вершині мікрогвинта 6. Обертання останнього викликає переміщення овальної гайки 5 уздовж мікрогвинта 6 уверх або вниз.

Термометр має один нерухомий і один рухомий контакти. Нерухомий контакт 11, з’єднаний із мідним проводом 3, впаяний у капіляр 10 нижче від нульової поділки основної шкали. Рухомий контакт 8 виготовлено з тонкого вольфрамового дроту, верхній кінець якого закріплено в овальній гайці 5. Нижня частина вольфрамового дроту проходить через отвір у підп’ятнику 7, далі стикається з вивідним провідником, припаяним до підп’ятника, і потім

проходить через отвір напрямної скляної втулки 9, упаяної в розширену частину капіляра.

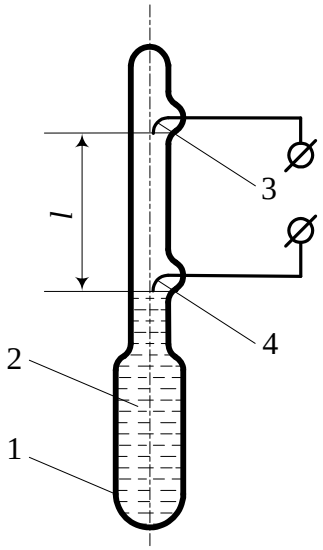


Рис. 4.5. Схема ртутного електроконтактного термометра з упаяними контактами

Отже, нижній кінець вольфрамового дроту 8 є рухомим контактом термометра і обертанням верхнього ковпачка може переміщуватись усередині вимірювального капіляра у будь-яку точку діапазону вимірювання. Якщо овальна гайка пересувається вздовж мікрогвинта за допомогою магніту 2 на певну поділку верхньої пікали, то нижній кінець вольфрамового дроту (рухомий контакт 8) встановлюється проти такої ж поділки нижньої (основної) шкали. Із нагріванням (охолодженням) нижньої частини термометра до заданої температури ртуть у капілярі з'єднує (розмикає) нижній контакт 11 із рухомим контактом.

Для електроконтактних термометрів зазвичай застосовують універсальні реле, що працюють за напруг 24,48 і 110 В постійного струму та 36, 110, 127 і 220 В змінного струму. Максимальний комутаційний струм через контакти термометра за напруги 220 В змінного струму не повинен перевищувати приблизно 50 мА.

Допустимі відхилення відліку за шкалою електроконтактного термометра для його налагодження мають не перевищувати ціну найменшої поділки. У разі застосування електроконтактного термометра нижня його частина має бути повністю занурена в контрольоване середовище.

Якщо термометр, градуйований для повного занурення, за умовами експлуатації не повністю занурений у вимірюване середовище, тоді не вся термометрична рідина піддаватиметься впливу вимірюваної температури: резервуар з термометричною рідиною та рідинний стовпчик, який виступає над поверхнею вимірюваного середовища, будуть під впливом різних температур.

У цьому разі в показання термометра слід вводити поправку на виступання рідинного стовпчика, яку обчислюють за формулою

$$\Delta t = n\beta(t_2 - t_1)$$

де n – висота стовпчика, який виступає над поверхнею вимірюваного середовища, виражена в поділках писали термометра (зазвичай у градусах Цельсія); β – коефіцієнт розширення термометричної рідини в склі (для ртуті 0,00016, для спирту 0,001), 1/К; t_2 – температура, показувана термометром, °С; t_1 – середня температура стовпчика, що виступає (вимірюється допоміжним термометром, резервуар якого прикріплюється до середини згаданого стовпчика основного термометра), °С.

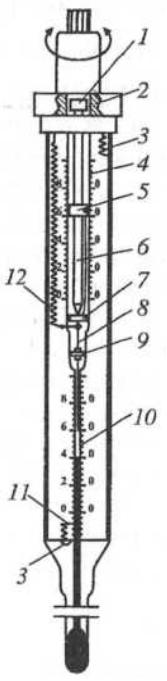


Рис. 4.6. Схема ртутного електроконтактного термометра з рухомим контактом:

1 – циліндричний якір; 2 – магніт; 3 – мідний провід; 4 – овальна скляна трубка; 5 – овальна гайка; 6 – мікрогвинт; 7 – підп'ятник; 8 – рухомий контакт; 9 – напрямна втулка; 10 – капіляр; 11 – нерухомий контакт; 12 – мідний провід

Якщо температура стовпчика, що виступає, нижча за вимірювану, то поправка Δt має знак «+», а якщо вища – знак «–». Похибки, спричинені виступанням термометричної рідини над поверхнею вимірюваного середовища, можуть сягати великих значень, тому нехтувати ними не варто, особливо для термометрів з органічним наповненням.

Ртутні скляні термометри завдяки простій будові та монтажу, дешевизні та відносно високій точності показань досить широко застосовують у лабораторній і виробничій практиці. Основні недоліки рідинних скляних термометрів – неможливість реєстрації та передавання показань на відстань, велика теплова інерція.

4.3. Манометричні термометри

Принцип дії манометричних термометрів (МТ) ґрунтується на вимірюванні тиску робочої (термометричної) речовини (газ, рідина, пароріднна суміш або газ з твердим абсорбентом) в замкненому об'ємі термосистеми під час зміни її температури (за умови незмінного об'єму).

Термосистема МТ (рис. 4.7, *а*) складається з термобалона 1, капіляра 2 і трубчастої пружини 4 вимірювача тиску, оснащеного пружинним термокомпенсатором 5. Зміна температури в об'єкті вимірювання змінює тиск у термобалоні 1, який через капілярну трубку 2 передається на манометричну пружину 4 вимірювача тиску. Під дією тиску вільний кінець пружини переміщується, що призводить до переміщення стрілки відносно шкали манометричного термометра. Геометричні розміри термобалона (виробляється з латуні чи спеціальних сталей) залежать від типу та призначення МТ: діаметр 5...30 мм, довжина 60...500 мм. Капіляр являє собою мідну чи сталеву трубку з внутрішнім діаметром 0,1.. .0,5 мм і довжиною до 60 м(для передавання сигналу МТ на більшу відстань застосовують пристрої дистанційного передавання тиску 3 – зазвичай це безшкальні дифманометри 13ДД11 з пневматичним вихідним сигналом).

За видом речовини, якою заповнено термосистему, МТ поділяють на газові, рідинні та конденсаційні.

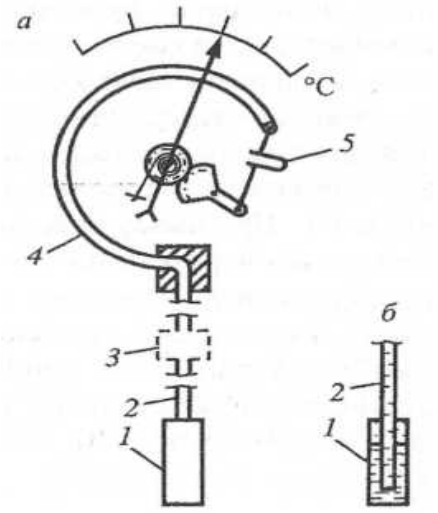


Рис. 4.7. Схема газового або рідинного (а) та конденсаційного (б- фрагмент) МТ:

1 – термобалон; 2 – капіляр; 3 – пристрій дистанційного передавання тиску; 4 – манометрична пружина; 5 – пружинний термокомпенсатор

Манометричним термометрам притаманні такі види похибок:

барометрична – визначається впливом коливань атмосферного тиску на манометричну пружину вимірювача тиску;

гідростатична – визначається різною висотою розміщення термобалона та вторинного перетворювача (має істотне значення тільки для рідинних та конденсаційних МТ);

температурна – визначається впливом температури навколишнього повітря на зміну об’єму термосистеми (капіляра та манометричної пружини).

4.3.1. Газові манометричні термометри

В основу принципу роботи газових МТ закладено закон Гей-Люссака, який встановлює залежність тиску ідеального газу від його температури:

$$p_H = p_0[1 + \beta(\Theta_H - \Theta)], \qquad (4.11)$$

де p_0, p_H − тиск газу за температур Θ = 273,15 і Θ_H; β = 1/273,15 – температурний коефіцієнт тиску газу, K^{-1}; Θ, Θ_H − початкова та кінцева температури газу, *K*.

Термосистема заповнюється інертним газом (азотом, аргоном, гелієм) під початковим тиском 1,0...3,0 МПа. Високий початковий тиск в системі забезпечує необхідну чутливість манометричного перетворювача до змін температури навколишнього середовища і одночасно зменшує погрішність, пов'язану із зміною атмосферного тиску. Істотний недолік газових МТ − висока інерційність із-за низького коефіцієнта тепловіддачі від термобалона газу. Для зменшення температурної похибки, зумовленої зміною температури довкілля, співвідношення об’ємів термобалона та капіляра з манометричною пружиною має бути великим, тому розміри термобалона збільшують до діаметра 20...30 мм та довжини 250...500 мм (тільки для цілей термокомпенсації, оскільки об’єм термобалона не залежить ні від робочого тиску, ні від діапазону вимірювання).

Для зменшення температурної похибки використовують також механічний термокомпенсатор 5, що являє собою біметалеву пластину, зігнуту у вигляді скоби. Зі змінюванням температури навколишнього середовища біметалева пластина розгинається (згинається), даючи можливість вільному кінцеві манометричної пружини зміститися під дією температурного приросту тиску в термосистемі. При цьому поворотний зубчастий сектор, а отже, й стрілка МТ залишаються нерухомими. Іноді з цією ж метою (у разі потреби вимірювання з підвищеною точністю) застосовують диференціальну термосистему, яка містить ще одну термосистему з аналогічними параметрами, але без термобалона, тому вона сприймає вплив тільки температури довкілля. Показання МТ з диференціальною термосистемою формує різниця зусиль двох манометричних пружин, що майже виключає вплив температури навколишнього середовища.

4.3.2. Рідинні манометричні термометри

Термосистему рідинних МТ заповнюють ртуттю під тиском

10…15 МПа за кімнатної температури або толуолом, ксилолом, пропиловим спиртом чи силіконовими рідинами під тиском 0,5.. .5 МПа; при цьому діапазон вимірювання для ртуті становить мінус 35...+600 °С, для органічних рідин - мінус 150...+300 °С (виробляються також манометричні термометри, наприклад, типу 73 (Німеччина), з діапазоном вимірювання мінус 200…+700 °С). До рідин, використовуваних у МТ, ставляться такі вимоги: якомога більший коефіцієнт об’ємного розширення, висока

теплопровідність, мала теплоємність і хімічна інертність до матеріалу термометра.

Зважаючи на те що рідина при тепловому розширенні може розвивати велике зусилля, рідинні МТ застосовують в регуляторах температури прямої дії.

Змінювання тиску від температури для рідини можна подати рівнянням

$$\Delta p = \frac{\beta}{\mu}\Delta t$$

де Δp – зміна тиску, Н/м^2; β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини, 1/°С; μ – коефіцієнт стисливості рідини, м^2/Н; Δt – зміна температури, °С.

Як видно з наведеного рівняння, зміна тиску рідини під час нагрівання є лінійною функцією температури, тому рідинні МТ, як і газові, мають (лінійну статичну характеристику) рівномірну шкалу.

Заходи для зменшення похибок, спричинених зміною температури навколишнього середовища, ті ж самі, що й для газових МТ. З метою компенсації температурної похибки в рідинних МТ використовують також інварний компенсатор, принцип дії якого ґрунтується на тому, що всередину капілярної трубки вставляється дріт з інвару, тож робоча речовина займає кільцевий зазор між дротом і внутрішньою стінкою капіляра. Діаметр інвару підбирають таким, щоб зі зміною температури приріст об'єму кільцевого зазору в капілярі дорівнював температурному приросту об'єму рідини в зазорі.

Рідинним МТ притаманна гідростатична похибка, зумовлена різною висотою монтажу термобалона та вимірювача тиску. Її можна компенсувати після монтажу приладу шляхом механічного зміщення покажчика приладу на потрібне значення шкали.

4.3.3. Конденсаційні манометричні термометри

Конденсаційні МТ широко застосовують в холодильній техніці. У цих МТ (рис. 4.7, *б*) рідина, що має температуру кипіння нижче вимірюваної, знаходиться в термодинамічній рівновазі з насиченою парою (тиск у резервуарі дорівнює тискові насиченої пари робочої рідини за вимірюваної температури). При підвищенні температури середовища частина рідини википає і тиск в системі росте. І навпаки, з пониженням температури насичені пари конденсуються і тиск падає.

Як термометричні речовини в конденсаційних МТ використовують легкокиплячі рідини: пропан, етиловий ефір, ацетон, толуол і т. ін. Термобалон заповнюється конденсатом приблизно на 0,75 об'єму, а простір над конденсатом - парою цієї рідини (рис. 4.7, *б*). Капіляр та манометрична пружина заповнені зазвичай тією ж рідиною (конденсатом). Капіляр уводять у термобалон так, щоб нижній його кінець завжди був занурений у робочу рідину.

У конденсаційних МТ використовують властивість кожної рідини мати свій характеристичний тиск пари, який залежить лише від температури, а не від об'єму. Тиск у термосистемі дорівнює тискові насиченої пари робочої

рідини за вимірюваної температури. Оскільки залежність тиску насиченої пари від температури хоча й однозначна, але й нелінійна, то і шкала конденсаційних МТ має значну нерівномірність. Для отримання рівномірної шкали такі МТ обладнують спеціальними лінеаризувальними пристроями.

Робочий тиск в конденсаційних МТ залежить від границь вимірювання та природи робочої рідини. Важлива перевага цих МТ – це те, що їх показання не залежать від зміни температури довколишнього середовища: температурний приріст об'єму рідини, яка заповнює капіляр та пружну трубку манометра, витискується до термобалона, не змінюючи робочого тиску в термосистемі, оскільки цей приріст мізерний порівняно з об'ємом вільного простору термобалона.

Конденсаційні МТ менш інерційні (термобалон невеликий) і високочутливі (в 5...10 разів вище, ніж газови), оскільки тиск насиченої пари різко змінюється зі зміною температури. Їм притаманні гідростатична та барометрична похибки, причому остання – тільки на початковій ділянці шкали, коли тиск у термосистемі ще незначний.

Загальні вади МТ – необхідність частої (через можливість розгерметизації термосистеми) перевірки, складність ремонту (важко знайти мікротріщину в капілярі), інерційність, великі габарити термобалона (особливо в газових МТ).

Динамічні властивості манометричних термометрів можна подати у вигляді передавальної функції (4.12)

$$W(p) = \frac{k}{Tp+1} e^{-\tau p} \qquad (4.12)$$

де k – коефіцієнт перетворення; T і τ – стала часу та час запізнення відповідно (значення T і τ наведено в табл. 4.3 [41]).

Перевірка манометричних термометрів

Манометричні термометри порівняються в рідинних термостатах шляхом порівняння їх свідчень зі свідченнями зразкових термометрів. У інтервалі температур від –30° до +300°С як зразкові термометри застосовуються ртутні скляні термометри, а при температурах нижче – 30° і вище +300°С – платинові термометри опору. Зразкові термометри по своїй термічній інерції мають бути близькі до тих, що порівняються.

Таблиця 4.3.

Динамічні властивості манометричних термометрів

Умови визначення характеристик	T, с	τ , с	τ / T
Нагрівання від 30 до 100 °С у бані з водою	1	8	0,12
Нагрівання від 40 до 60 °С у потоці повітря (швидкість 8 м/с)	2	12	0,17

Для манометричних термометрів число крапок, що порівняються, також має бути не менше трьох, відповідних початку, середині і кінцю шкали або діаграми. При перевірці термобалон термометра повністю занурюють в термостат.

Термометри повіряють в одних і тих же крапках – спочатку при підйомі температури в термостаті, а потім при пониженні температури. Свідчення відлічують 2 рази: до і після постукування по термометру. Результати-перевірки заносять в протокол, а на термометри, придатні до вживання, за даними протоколу виписують свідоцтва.

Залежно від діапазону температур, при яких проводиться перевірка термометрів, термостати заповнюються різними рідинами. У інтервалі температур від 1 до 90° застосовується вода, в інтервалі від 90 до 300° - мінеральне масло, в інтервалі від 300 до 500° – суміш солей: 45% $NaNO_3$ + 55% KNO_3.

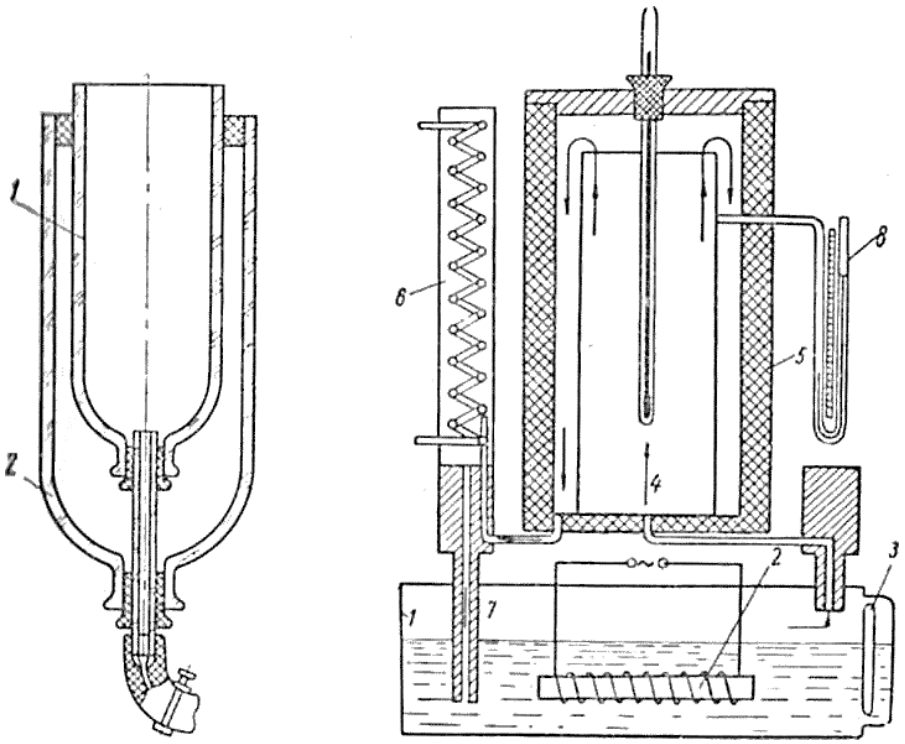
Для перевірки термометрів при негативних температурах термостати заповнюють етиловим спиртом або іншими незамерзаючими рідинами, які охолоджуються твердою вуглекислотою або рідким повітрям.

Нульову точку повіряють в судинах Дьюара або термостатах з тануччим льодом. Простий термостат для перевірки нульової крапки показаний на рис. 4.8. Термостат складається з скляних судин 1 і 2, вставлених один в іншій. Судина 1 заповнюється подрібненими шматочками чистого льоду і заливається водою, що дистилює. Рівень води в судині не повинен доходити до верхнього шару льоду. Надлишок води віддаляється через отвір внизу судини. Повітря, що знаходиться між судинами, служить ізолятором тепла. Рідинний термометр занурюється в лід, вертикально на глибину декілька вище за нульову крапку.

При відліку нульової крапки лід зверху трохи знімають, щоб митий було видно меніск рідини в капілярі, проводять відлік і знову закривають термометр. При перевірці нульової точки манометричних термометрів дуже важливо, щоб термобалон повністю був занурений в термостат . Число відліків має бути не менше чотирьох з інтервалом через 1 хв. Середнє з відліків відповідає дійсному положенню нульовому крапки. Положення нульової точки термометра, що порівняється, визначають 2 рази: до перевірки і після нагрівання до максимальної температури. Пониження крапки після нагрівання термометра не повинне перевищувати допустимої величини.

Перевірка точки 100 проводиться в термостаті, показаному на рис.4.8. Термостат складається з судини 1, наповненого на 2/3 об'єму дистильованою водою. Судина забезпечена електричним нагрівачем 2, що нагріває воду до кипіння. Рівень води в судині контролюється водомірним склом 3. Що утворився в судині пара проходить по внутрішньому циліндру 4 і поступає в кільцевий простір між циліндрами 4 і 5, потім по трубці поступає в холодильник 6, де конденсується. Конденсат стікає по трубці 7 назад в судину 1. Завдяки двосторонньому обігріву стінок циліндра 4 температура усередині нього підтримується постійній, рівній температурі насиченої пари.

Надмірний тиск в циліндрі 4 вимірюється в міліметрах водяного стовпа за допомогою U-образного манометра 8.



а *б*

Рис. 4.8. Термостат для перевірки:
а – нульової крапки термометра, *б* – крапки 100

Температура кипіння води залежно від барометричного тиску визначається по рівнянню

$$t_к = 100 + 0{,}0367\,(P - 760) - 0{,}000023\,(P - 760)^2 \qquad (4.13)$$

де Р – барометричний тиск з внесеними поправками в мм рт. ст.

Температура кипіння води залежно від барометричного тиску може бути визначена по таблицях. Термометр, що порівняється, встановлюється через отвір в кришці термостата рис. 4.8. на глибину, залежну від типу термометра. Термометр, що порівняється, повинен знаходитися в парах киплячої води не менше 15-20 хв., після чого проводяться відліки барометричного тиску, надмірного тиску і свідчень термометра, що порівняється. Число відліків по термометру, що порівняється, має бути не менше п'ятьох з інтервалом через 1 хв. Середнє значення з п'яти відліків береться за дійсну величину свідчень термометрів. Для перевірки проміжних точок термометрів застосовуються рідинні термостати різних конструкцій. Схема одного з термостатів для позитивних температур показана на рис.4.9. Внутрішній циліндр покращує циркуляцію рідини усередині термостата. Однорідність температури рідини забезпечується інтенсивним перемішуванням за допомогою мішалки 1 Електричний нагрівач 2 зазвичай виготовляється з ніхромової дроту.

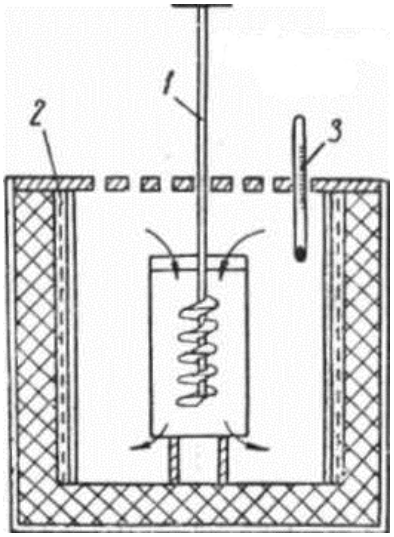


Рис. 4.9. Схема термостата для позитивних температур:
1 – мішалка; 2 – електричний нагрівач; 3 – термометр, що порівнюється та зразковий

Термометри, що порівняються і зразковий, 3 занурюються в термостат через отвори в кришці. Включають мішалку і нагрівач.

Досягши необхідної температури відлічуються свідчення зразкового і термометрів, що порівняються. Число відліків має бути не менше чотирьох. З отриманих відліків обчислюється середня арифметична величина для кожного термометра і округляється до десятої частки ціни ділення. Температура в термостаті на час відліку не повинна підвищуватися більш ніж на 0,1° при перевірці в обмеженні від +1 до +300°С і на величину не більш 0,3° для температур від100 до 500°С.

Температура в термостаті визначається як середня величина свідчень зразкового термометра.

4.4. Засоби вимірювання, що працюють у комплекті з термоперетворювачами опору

Принцип дії та характеристикі *термоперетворювачів опору* розглянуті у другому розділі.

У практиці технологічних вимірювань для вимірювання температури із застосуванням ТО використовують нульовий метод або метод відхилення. Із засобів вимірювання для цього широко застосовують мости (зрівноважені та незрівноважені), логометри та нормувальні перетворювачі. Високу точність вимірювань температури та метрологічної атестації ТО, що зазвичай проводяться в лабораторних умовах, забезпечують потенціометри постійного струму.

4.4.1. Зрівноважені мости

Такі мости широко застосовують для вимірювання, записування та регулювання температури разом з ТО стандартних градуювань (дод. 1) – принцип роботи електронних автоматичних мостів постійного та змінного струмів ґрунтується на вимірюванні опору методом зрівноваженого моста.

Принципову схему зрівноваженого моста постійного струму з підключеним ТО показано на рис. 4.10.

Міст складається з двох резисторів постійного опору R_1 і R_2, резистора змінного опору R_3 і ТО з опором R_t. До опору ТО додається опір двох з'єднувальних проводів $2R_п$. Одна діагональ моста *ab* містить джерело живлення *E,* друга *cd* – вимірювальна – нуль-прилад; цей прилад має бути дуже чутливим і реагувати на малі струми, позаяк саме за його показаннями фіксується рівновага моста, тому як нуль-прилад зазвичай використовують гальванометр.

За рівноваги моста, яка досягається переміщенням повзунка реохорда R_3, струм у вимірювальній діагоналі моста $I_{нп} = 0$, оскільки потенціали в точках *c* і *d* однакові. При цьому справедливі такі рівності:

$$R_2 I_2 = R_1 I_1 \tag{4.14}$$

$$R_3 I_3 = (R_t + 2R_п) I_t \tag{4.15}$$

Поділивши рівняння (4.14) на вираз (4.15), одержимо

$$\frac{R_2 I_2}{R_3 I_3} = R_1 I_1 / [(R_t + 2R_п) I_t]$$

Якщо $I_{нп} = 0$; $I_1 = I_t$; $I_2 = I_3$, отримаємо умову рівноваги моста:

$$R_1 R_3 = R_2 (R_t + 2R_п)$$

З умови рівноваги визначимо шукане:

$$R_t = \frac{R_1 R_3}{R_2} - 2R_п \tag{4.16}$$

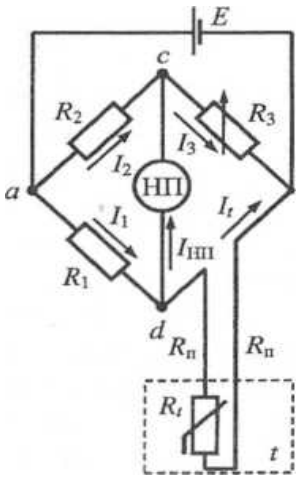


Рис. 4.10. Принципова схема зрівноваженого моста НП - нуль-прилад

Із рівняння (4.16) видно, що опір R_t, у стані рівноваги можна визначити, якщо відомі опори R_1 R_2, R_3 і $R_п$.

Резистори R_1 R_2, R_3 виготовлено з манганіну, тому їх опори не змінюються зі зміною температури. Отже, точність вимірювання залежить від сталості опору з'єднувальних проводів $2R_п$ можливої тільки за умови незмінності їх температури (фактично вона дорівнює температурі зовнішнього середовища).

У випадку, коли коливання температури зовнішнього середовища значні і похибка вимірювання перевищує граничнодопустиме значення, застосовують трипровідну схему підключення терморезистора R_t, для чого одну з вершин діагоналі (наприклад, *b* на рис. 4.11) живлення моста переносять безпосередньо до R_t.

У результаті опір одного проводу $R_п$ додаватиметься до опору резистора R_1 а другого – до опору резистора R_2. Тоді рівняння рівноваги моста набуде вигляду

$$R_1(R_3 + R_п) = R_2((R_t + R_п) \qquad (4.17)$$

Якщо міст симетричний, тобто якщо $R_1 = R_2$, то $R_t = R_3$. А отже, змінний опір з'єднувальних проводів ($2R_п$) не впливатиме на показання моста.

Вада зрівноважених мостів, складених за наведеними схемами (рис. 4.10 і 4.11), – невизначеність, яку вносить у вимірювання перехідний опір контакту в резисторі з регульованим опором R_3. Для усунення цієї вади його рухомий контакт розміщують у вершині вимірювальної діагоналі, а резистор R_3 – опиняється у двох плечах (як $R_Р$ на рис. 4.12). Отже, якщо міст зрівноважується переміщенням рухомого контакту, змінюється опір відразу обох плечей, а перехідний опір контакту, розміщений у вимірювальній діагоналі, не позначається на результаті вимірювання, оскільки струму в момент зрівноваження немає.

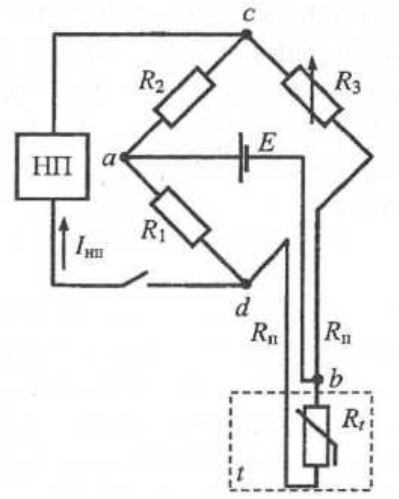


Рис. 4.11. Трипровідна схема підключення ТО до зрівноваженого моста

Мостам змінного струму притаманна ще одна особливість, яка спричинює додаткове ускладнення будови: для зрівноваження їх схеми мають задовольнятися дві незалежні умови рівноваги між опорами та фазовими зсувами у протилежних плечах моста. Тож, якщо в мостах постійного струму зрівноваження досягається регулюванням одного опору (R_3 у схемах на рис. 4.10 і 4.11), то для зрівноваження мостів змінного струму в загальному випадку, тобто за наявності в плечах як активних, так і реактивних опорів, коли повний опір плеча моста виражається у комплексній формі ($z - R + j(X_L - Xc)$, де R – активний опір; $X_L = 2\pi fL$ – індуктивний опір; $X_c = 1 / (2\pi fC)$ – ємнісний опір; f – частота струму), потрібно регулювати не менше ніж два параметри. І складність їх зрівноваження полягає в тому, що в процесі забезпечення однієї умови, наприклад, рівності добутків модулів опорів у протилежних плечах: $z_1 z_3 = z_2 z_4$, порушується друге співвідношення - між фазовими зсувами: $\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4$ Утім мостові схеми, використовувані для вимірювання температури, містять лише активні опори, тому їх рівновага визначається лише рівністю добутків опорів протилежних плечей і досягається регулюванням опору одного (змінного) резистора схеми.

Вплив зміни температури навколишнього середовища $t_{н.с}$ на вихідний сигнал моста (через зміну опору з'єднувальних проводів $R_п$) зокрема може компенсуватися й так, як робиться в манометричних термометрах (диференціальна термосистема) чи тензометричних перетворювачах, а саме: у суміжне з ТО плече моста підключають такі ж проводи $R_{п2}$, як і з'єднувальні $R_{п1}$ якими ТО підключено до моста. Тоді, як і у випадку з трипровідною схемою підключення ТО до моста, температурний приріст опору $\Delta R_{п1}(\Delta t_{н.с})$ буде скомпенсовано аналогічним приростом $\Delta R_{п2}(\Delta t_{н.с})$, оскільки вони увійдуть у рівняння рівноваги моста з протилежними знаками. Таку схему називають чотирипровідною схемою підключення ТО.

4.4.2. Автоматичні мости

В автоматичних електронних зрівноважених мостах повзунок реохорда переміщається не вручну, а автоматично. Вимірювальна схема таких мостів може бути заживлена як постійним, так і змінним струмом. В автоматичних мостах змінного струму вирішальне значення мають активні опори, тому виведені для мостів постійного струму співвідношення (4.14) – (4.17) зберігаються й для автоматичних мостів змінного струму. Останні мають ряд переваг перед мостами постійного струму: вимірювальна схема живиться від однієї з обмоток силового трансформатора електронного підсилювача, тобто не потрібно додаткового джерела живлення (сухого елемента), а також вібраційного перетворювача (модулятора) у складі підсилювача.

Існує багато різних модифікацій автоматичних зрівноважених мостів, але принцип їх роботи однаковий. Як приклад тут розглядається принципова схема електронного автоматичного зрівноваженого моста змінного струму (рис. 4.12). Резистори постійного опору R_1,R_2, R_3 і R_4 вимірювальної схеми виготовлені з манганіну, а реохорд $R_р$ – з манганіну або спеціального (паладієвольфрамового) сплаву. Вимірювальна схема живиться змінним струмом, напруга якого 6,3 В.

Термоперетворювач опору підключають за трипровідною схемою. Реохорд розміщено у двох суміжних плечах моста. Завдяки такій конструкції підвищується чутливість мостової схеми, а також усувається вплив перехідного опору рухомого контакту.

У разі потреби змінити опір, що буває зумовлено потребою змінення діапазону вимірювання, змінюють загальний опір $R_{ПР}$ цієї ділянки за рахунок зміни $R_в$ (інколи й $R_ш$), залишаючи при цьому $R_р$ стандартним. Шунт $R_ш$ дає змогу довести еквівалентний опір реохорда $R_е = R_р R_ш / (R_Р + R_ш)$ разом із шунтом до стандартного значення (90 або 100 ±0,1 Ом), а шунт $R_в$ дозволяє змінити діапазон вимірювань. За допомогою баластного резистора $R_б$ у діагоналі живлення обмежують робочий струм для запобігання змінюванню опору R_t через саморозігрівання ТО.

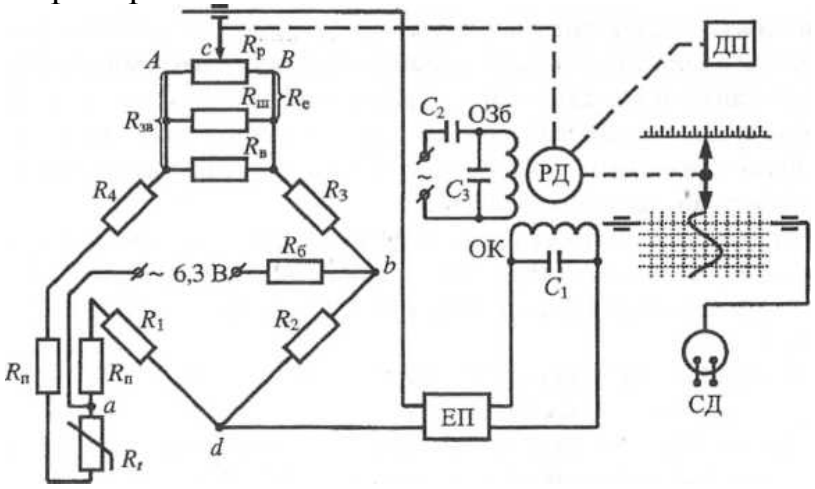


Рис. 4.12. Принципова схема електронного автоматичного моста змінного струму:

ДП – допоміжні пристрої; СД – синхронний двигун

Конденсатори C_1 і C_3 разом із відповідними обмотками утворюють автоколивальні *LC*-контури, настроєні на резонасну частоту основного сигналу (50 Гц), завдяки чому сигнали вищих гармонік (шуми) відфільтровуються. Крім того, вони шунтують відповідні обмотки РД для компенсації індуктивної складової струму в цих обмотках. Конденсатор C_2 забезпечує необхідний фазовий зсув (90°) між магнітними потоками ОЗб та ОК.

Напруга розбалансу на вершинах *c i d* моста подається на вхід ЕП, де вона підсилюється до значення, достатнього для приведення в дію РД. Останній, обертаючись у той або той бік (залежно від фази сигналу розбалансу, тобто від знака приросту опору ТО ΔR_t), зміщує повзунок реохорда R_p, зрівноважуючи вимірювальну схему моста, і одночасно переміщує стрілку відлікового пристрою та перо самописа приладу. Діаграмний папір протягується синхронним двигуном (у багатоточкових приладах цей двигун використовується також для приводу друкувального пристрою). Якщо міст перебуває в рівновазі, то РД не обертається, оскільки напруга на вхід електронного підсилювача не подається.

Аналогічну вимірювальну схему має й зрівноважений міст постійного струму, однак його електронний підсилювач додатково має вібраційний перетворювач (модулятор), і тому вузол підсилення моста такий самий, Як і потенціометра.

Виведення розрахункових рівнянь автоматичного моста грунтується на загальній умові рівноваги мостової схеми.

Автоматичні мости різних груп вирізняються конструкцією, габаритами, видом діаграмного паперу, а також функціональними ознаками: часом проходження шкали покажчиком (від 1 до 10 с), кількістю точок вимірювань (1, 3, 6, 12), видом допоміжного пристрою. Як допоміжні пристрої, що розширюють функціональні можливості приладів, використовують дво- чи трипозиційні регулювальні (сигналізувальні) пристрої, перетворювачі (реостатні, диференціально-трансформаторні, феродинамічні, частотні, пневматичні), лінійні пневматичні регулятори.

4.4.3. Незрівноважені мости

Незрівноважені мости (мости Вітстона) використовують для вимірювання температури рідше, ніж решту подібних засобів через притаманні їм вади. Проте такі мости широко застосовують у вимірювальних засобах, величина розбалансу мостової схеми яких не може зводитися до нуля, як це буває в разі вимірювання зрівноваженими мостами (в автокомпенсаторах, логометрах, теплових витратомірах, приладах для вимірювання фізико-хімічних властивостей речовин, зокрема газоаналізаторах та концентратомірах тощо).

За принципом роботи незрівноважений міст (рис. 4.13) аналогічний зрівноваженому. Головна відмінність – це те, що величину розбалансу не-

зрівноваженого моста не зводиться до нуля, як зрівноваженого, а вимірюється, позаяк саме вона є мірою вимірюваної ним величини. Тому замість нуль-приладу в діагональ вимірювання *cd* такого моста увімкнено міліамперметр.

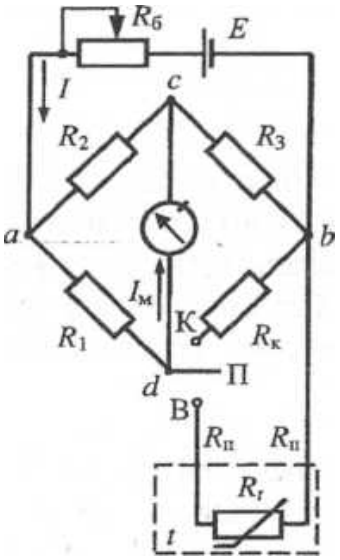


Рис. 4.13. Принципова схема незрівноваженого моста

Неодмінна умова вимірювання R_t незрівноваженим мостом – сталість напруги E або різниці потенціалів U_{ab}, що підводиться до діагоналі живлення. Для забезпечення дотримання цієї умови в схемі, крім режиму «Вимірювання» (В), передбачено також режим «Контроль» (К). За цього режиму (перемикач П переводиться в положення «К») відповідність U_{ab} розрахунковому значенню перевіряють підключенням до мостової схеми замість ТО R_t контрольного опору $R_к$: якщо U_{ab} дорівнює значенню, за яким градуйовано прилад, то значення струму $I_м$ у вимірювальній діагоналі моста дорівнюватиме його розрахунковому значенню (при цьому стрілка міліамперметра встановлюється на червоній відмітці пікали міліамперметра). У разі відхилення стрілки від контрольної відмітки шкали значення U_{ab} підганяється змінюванням опору реостата $R_б$, увімкненого в діагональ живлення. Використання стабілізованого джерела живлення моста позбавляє потреби в такому налагодженні напруги живлення перед вимірюванням.

Якщо під час вимірювання опору R_t (перемикач П у положенні *«В»*) виконується умова рівноваги моста, тобто добутки опорів протилежних плечей однакові, то у вимірювальній діагоналі моста струм проходити не буде. Це означає, що температура контрольованого середовища, у яке поміщено ТО, дорівнює початковому значенню діапазону вимірювання (наприклад, 0°С).

Зі зміненням температури контрольованого середовища відповідно буде змінюватися опір R_t тож умова рівноваги моста порушиться, і в його вимірювальній діагоналі проходитиме струм (шкала міліамперметра проградуйована в градусах), значення якого буде пропорційним вимірюваній температурі *t*.

Ще одна вада незрівноважених мостів – те, що змінення сили струму у вимірювальній діагоналі пов'язано зі зміною опору R_t, нелінійною залежністю.

4.4.4. Логометри

Для вимірювання електричного опору (зокрема, опору терморезистивних перетворювачів) застосовують логометри – магнітоелектричні прилади, рухома система яких складається з двох мідних рамок r_1 і r_2, розміщених під кутом одна до одної та жорстко закріплених між собою (рис. 4.14).

Кут повороту такої системи залежить від співвідношення струмів у обох рамках:

$$\varphi = f(\frac{I_1}{I_2})$$

Рухома система перебуває в магнітному полі постійного магніту з полюсними наконечниками, проточеними таким чином, що зазор між ними і сталевим осердям (якраз у цьому зазорі рухаються рамки) у центрі мінімальний, а ближче до країв – збільшується. Нерівномірність зазору зумовлює нерівномірність магнітної індукції B у ньому: найбільша вона в центрі, а в обох напрямах від центра – зменшується, тобто $B = f(\varphi)$.

Від джерела постійного струму E в рамки r_1 і r_2 логометра надходять протилежно спрямовані струми I_1 та I_2, тому моменти M_1 і M_2, що виникають у рамках у результаті взаємодії струмів із полем постійного магніту, також будуть напрямлені зустрічно.

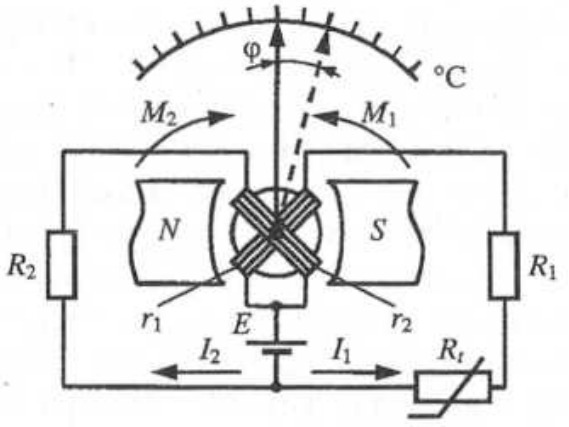


Рис. 4.14. Спрощена принципова схема логометра

Значення кожного з моментів можна виразити залежностями:

$$M_1 = cI_1 \text{B1}; M_2 = cI_2 B_2 \qquad (4.18)$$

де c – постійний коефіцієнт, який залежить від будови рамки (c = *2rln*, тут *r,l i n* – відповідно радіус, довжина та кількість витків рамки); B_1, B_2 - магнітні індукції, що пронизують рамки r_1 і r_2.

Будова логометра, вимірювальна схема якого також живиться постійним струмом від електромережі чи сухої батареї, майже аналогічна будові мілівольтметра. Логометр відрізняється від мілівольтметра тим, що він не має протидійних обертанню рамок пружин, а зрівноваження моменту, який виникає в одній рамці й обертає рухому систему, відбувається за рахунок протидії моменту другої рамки. Струмовідводи рамок виготовляють безмоментними, наприклад, із тонкої золотої стрічки, або маломоментними (малий протидійний момент потрібен для того, щоб повернути стрілку на нульову позначку, коли в приладі немає струму) – з тонкого бронзового дроту.

Розглянемо роботу логометра. Якщо, наприклад, змінення опору R_t, зумовить збільшення струму I_1, то це призведе до збільшення моменту M_1 який почне обертати рухому систему в напрямі проти годинникової стрілки. При цьому активні сторони рамки r_1 зміщуватимуться від центра зазору до країв, тобто в бік зменшення магнітної індукції B_1 а активні сторони рамки r_2, навпаки, – у бік збільшення магнітної індукції B_2. У результаті, як видно з рівняння (4.18), момент M_1 буде зменшуватися, а M_2 - зростати.

За певного кута повороту рухомої системи φ настане рівновага: $M_1 = M_2$ або $cI_1B_1 = cI_2B_2$, звідки $I_2 / I_1 - B_1 / B_2 = \Psi(\varphi)$ або $\varphi = f(I_1 / I_2)$. Виразивши кожен зі струмів через напругу джерела живлення E та відповідні опори, отримаємо

$$\varphi = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left[\frac{\frac{E}{(r_2 + R_2)}}{\frac{E}{(R_t + r_1 + R_1)}}\right] = f[\frac{(R_t + r_1 + R_1}{r_2 + R_2}]$$

Оскільки в отриманому рівнянні величини r_1, r_2, R_1, R_2 - сталі, то

$\varphi = f(R_t)$.

Таким чином, логометр вимірює опір R_t. А позаяк він безпосередньо вимірює відношення двох струмів, генерованих від одного джерела, то зменшення напруги останнього в певних межах не впливатиме на показання логометра.

Увімкнення послідовно з рамками r_1 і r_2 додаткових високоомних резисторів R_1 і R_2 з манганіну (інколи їх називають баластними) зменшує вплив коливань температури зовнішнього середовища на показання логометра. Однак при цьому зменшуються струми I_1 та I_2, а отже, – і чутливість приладу. Щоб підвищити чутливість, рамки логометра підключають до вимірювальної діагоналі незрівноваженого моста (рис. 4.15).

Термоперетворювач опору R_t підключають до вимірювальної схеми логометра за дво- чи трипровідною схемами. За трипровідною схемою два з трьох проводів, які виходять із головки ТО, через підгінні (манганінові) котушки $R_{п1}$ і $R_{п2}$ вводяться в логометр, а третій приєднується до джерела живлення (без котушки, бо його опір не впливає на роботу логометра).

Середня точка між рамками через послідовно ввімкнені мідний R_5 і манганіновий R_6 резистори сполучена з вершиною моста, до якої підведено

один провід джерела живлення *E,* а другий – до протилежної вершини моста. Резистор R_6 змінює кут повороту рухомої системи логометра, а R_5 забезпечує компенсацію додаткової температурної похибки, спричиненої зміною температури середовища, у якому перебуває прилад.

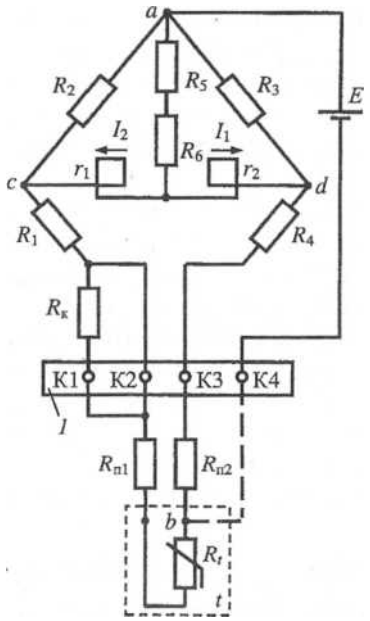


Рис. 4.15. Електрична схема логометра:

1 – клемна колодка

Для забезпечення найбільшої чутливості мостова схема приладу (рис. 4.15) симетрична, тобто $R_2 = R_3$. Опір R_1 підбирають так, щоб міст перебував у рівновазі за величиною опору ТО R_t яка відповідає значенню температури в середині шкали приладу. При цьому внаслідок рівності потенціалів на вершинах моста *c* і *d* спад напруги на резисторах R_2 і R_3, а отже, і струми I_1 і I_2 у рамках r_1 і r_2 однакові, й обидві рамки розміщуються в магнітному полі симетрично відносно осі полюсних наконечників магніту.

У разі підвищення опору R_t ТО (підвищення температури) струм I_2 у рамці r_2 зменшиться, а струм I_1 у рамці r_1 відповідно збільшиться. Зі зменшенням опору ТО (зниженням температури) відбудеться зворотний перерозподіл струмів: струм у рамці r_2 збільшиться, а в рамці r_1 – зменшиться. Різниця обертальних моментів, яка виникає в обох випадках, повертатиме рухому систему в один або другий бік до настання нової рівноваги.

Позаяк плечі $R_1 + R_{п1} + R_t$ і $R_{п2} + R_4$ суміжні, то з урахуванням симетричності моста зміна опору з'єднувальних проводів через коливання температури навколишнього середовища майже не впливає на результати вимірювань. Підганяння зовнішнього опору до розрахункового значення провадять роздільно для кожного з'єднувального проводу.

Для перевірки правильності підганяння опору з'єднувальних проводів їх закорочують на затискачах головки ТО, а замість R_t підключають кон-

трольний опір (котушку) R_k, для чого провід, який підводив струм до R_t через клему К2, шунтуючи $R_к$, знімається з клеми К2. У цьому разі після увімкнення живлення стрілка логометра має вказати на червону контрольну риску, нанесену в середині шкали логометра. Якщо відхилення стрілки від червоної риски перевищує ± 1,5 % діапазону шкали, необхідно перевірити опір з'єднувальних проводів, а потім сам логометр.

4.5. Термоелектричні перетворювачі

4.5.1. Загальні відомості

Основу будь-якого ТП становить термопара, утворена двома провідниками *A* і *B,* два з'єднання (спаї) яких мають різні температури (t_1 і t_2). Ось як подає терміни *термопара* і *термоелектричний перетворювач* ДСТУ 3307-96 «Перетворювачі термоелектричні. Подовжувальні та компенсаційні проводи. Допуски та система ідентифікації»**:** ***термопара*** – два провідники з різних матеріалів, які з'єднані на одному кінці й утворюють частину пристрою, що використовує для вимірювання температури термоелектричний ефект; ***термоелектричний перетворювач***– термоперетворювач, який містить термопару і дія якого грунтується на використанні термо-ЕРС термопари від температури. У практиці вимірювань ці терміни зазвичай використовують як синоніми, традиційно віддаючи перевагу застосуванню першого; використовується також назва *термоелектричний термометр.* Це зумовлює появу на виході термопари ЕРС $E_{AB}(t_2t_1)$, залежну, з одного боку, від матеріалу провідників *A* і *B, з* другого боку – від температур t_1 і t_2 (її називають термо-ЕРС). Зазвичай температура одного спаю t_1 (його називають холодним) постійна й відома; вона слугує опорною (нульовою) точкою й позначається через t_0. Температура другого спаю t_2 (його називають гарячим або робочим) – це температура, якої набуває цей спай у досліджуваному середовищі з температурою *t,* що підлягає вимірюванню. Оскільки вимірювальна інформація надходить від спаю, розміри якого можуть бути дуже малими, це забезпечує високу швидкодію й дозволяє проводити точкові вимірювання температури. Зазначені дві особливості визначають перевагу застосування термопар порівняно з ТО. Інша перевага термопари полягає у вироблюваному сигналі – термо-ЕРС, для вимірювання якого немає потреби пропускати струм через термоелемент, а тому не виникає, як у випадку з ТО, похибки, пов'язаної із саморозігрівом, що істотно для вимірювань у системах з малою тепловою інерцією, а також у разі вимірювання низьких температур.

Недолік термопари – для вимірювання належить знати температуру опорного спаю. Будь-яка похибка дотримання t_0 = 0 °С спричиняє таку ж похибку визначення вимірюваної температури *t.*

Термоелектричні явища, що відбуваються в металевих або напівпровідникових колах, показують, що в них, крім ефекту Джоуля, відбувається перетворення енергії теплового руху в електричну енергію рухомих зарядів.

Ефект Пельтьє. У з'єднанні двох різних провідників *A* і *B* з однаковою температурою *t* (рис. 4.16, *а*) установлюється різниця потенціалів, названа ЕРС Пельтьє $P_{AB}(t)$, що залежить тільки від природи провідників і їх температури:

$$U_M - U_N = P_{AB}(t)$$

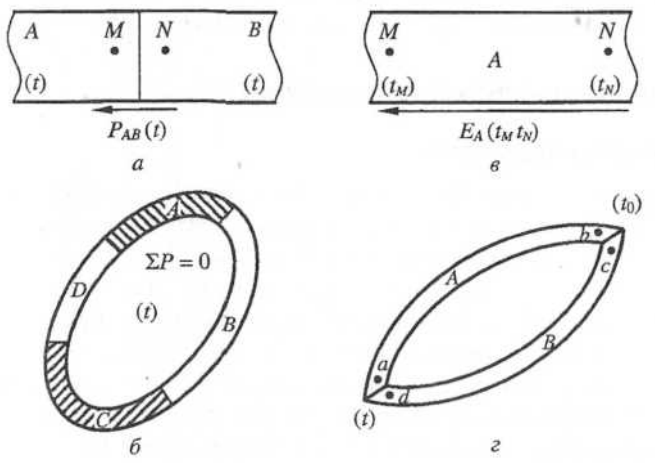


Рис. 4.16. Термоелектричні ефекти:
а – Пельтьє, *в* – Томсона, *г* – Зеебека, *б* – закон Вольта

Відповідно до закону Вольта, в ізотермічному замкненому колі, складеному з різних провідників, сума ЕРС Пельтьє дорівнює нулю. Звідси для кола, що складається з металевих провідників *A, B, C, D* (рис. 4.16, *б*),

$$P_{AB}(t) + P_{BC}(t) + P_{CD}(t) + P_{DA}(t) = 0$$

Інакше в замкненому контурі мали б виникати струм і дисипація енергії внаслідок ефекту Джоуля, що суперечило б теоремі Карно, відповідно до якої система з постійною температурою не може бути джерелом енергії. Попереднє співвідношення можна записати також у вигляді

$$P_{AB}(t) + P_{BC}(t) + P_{CD}(t) + = -P_{DA}(t)$$

або

$$P_{AB}(t) + P_{BC}(t) + P_{CD}(t) = P_{AD}(t)$$

оскільки $P_{AD}(t) = -P_{DA}(t)$ – Звідси випливає, що коли два провідники *A* і *D* з'єднані проміжними провідниками, то в ізотермічному колі різниця потенціалів між крайніми провідниками *A* і *D* буде такою ж, як і за безпосереднього з'єднання цих провідників.

Ефект Томсона. Між двома точками *M* і *N* однорідного провідника А (рис. 4.16, *в*) з різними температурами виникає ЕРС (її називають ЕРС Томсона), що залежить тільки від природи провідника й температур t_M і t_N:

$$E_A(t_M t_N) = \int_{t_N}^{t_M} h_A dt$$

де h-залежний від температури коефіцієнт Томсона для провідника A.

Закон Магнуса говорить, що якщо кінці кола виготовлені з того самого провідника й мають однакову температуру, то ЕРС Томсона дорівнює нулю.

Ефект Зеебека. Розглянемо замкнене коло, що складається із двох провідників A і B, спаї яких мають температури t і t_0. Ці провідники утворюють термопару (рис. 4.16, *г*). У термопарі виникає так звана ЕРС Зеебека $E_{AB}(tt_0)$, яка є результатом ефектів Пельтьє й Томсона в цьому колі. Дійсно, ЕРС між точками a та b дорівнює $e_{ab} = \int_{t_0}^{t} h_A dt$; між точками b і c дорівнює $e_{bc} = P_{AB}(t_0)$; ЕРС між точками c і d визначається інтегралом

$e_{cd} = \int_{t_0}^{t} h_B dt$; ЕРС між точками d і a $e_{da} = P_{BA}(t)$. Загальна ЕРС, яка дорівнює сумі наведених ЕРС, являє собою ЕРС Зеебека:

$$E_{AB}(tt_0) = P_{AB}(t) - P_{AB}(t_0) + \int_{t_0}^{t} (h_A - h_B) dt$$

Якщо за одну з температур, наприклад t_0, узяти деяку певну початкову температуру (наприклад, 0 °С), то ЕРС пари провідників A та B буде залежати тільки від t.

Відкрите у 1821 р. Зеебеком явище термоелектричного ефекту (ефект Зеебека) лежить в основі принципу дії термопари: якщо в замкненому контурі, утвореному двома провідниками (термоелектродами) A та B (див. рис. 4.16, *г*), виготовленими з різних металів чи сплавів, місця їх з'єднання матимуть різну температуру, то в такому контурі проходитиме електричний струм. Якщо до такого кола ззовні подається струм, то один зі спаїв буде нагріватися, а другий охолоджуватись – залежно від напряму проходження струму (ефект Пельтьє).

У разі розмикання такого кола на його кінцях виникає термо-ЕРС (її можна виміряти), величина та напрям якої залежать від матеріалу термоелектродів A та B і від різниці температур у спаях (чим вона більша, тим більша й термо-ЕРС). Робочий кінець (гарячий спай) ТП створюють спаюванням або зварюванням термоелектродів, вільні кінці яких (холодний спай) приєднують за допомогою з'єднувальних проводів до вимірювальних приладів.

Напрям струму залежить від співвідношення температур спаїв, тобто якщо $t > t_0$, то струм буде проходити в одному напрямі, якщо $t < t_0$, – то в протилежному. Один термоелектрод, від якого у спаї з меншою температурою струм проходить до другого термоелектрода, вважають позитивним (у позначеннях термопар і в індексах термо-ЕРС його записують першим), а другий – негативним. Наприклад, якщо $t_0<t$ (рис. 4.16, *г*) і струм у спаї з температурою t_0 напрямлений від термоелектрода A до термоелектрода B, то термоелектрод A буде термопозитивним, а B – термонегативним.

За законом Вольта в замкненому колі, утвореному двома різнорідними провідниками *A* та *B* (рис. 4.16, *б*), коли температури місць їх з'єднання однакові ($t_0 = t$) і немає сторонніх ЕРС, термострум не виникає. Тому контактні (у місцях спаїв) ЕРС однакові за величиною, але протилежні за знаком, а отже, сумарна термо-ЕРС кола дорівнюватиме нулю:

$$E_{AB}(tt) = e_{ab}(t) + e_{BA}(t) = 0 \qquad (4.19)$$

Тоді з рівняння (4.19) маємо:

$$e_{AB}(t) = -e_{BA}(t) \qquad (4.20)$$

тобто, якщо позначення електродів у індексах термо-ЕРС переставити місцями, її знак змінюється на протилежний.

Якщо ж спаї термопари мають різну температуру ($t \neq t_0$), то, враховуючи вираз (4.20), з рівняння (4.19) отримуємо *основне рівняння термопари,* що виражає в загальному вигляді залежність сумарної термо-ЕРС, яка виникає в колі з двох різнорідних термоелектродів *A* та *B,* від температур їх спаїв:

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \qquad (4.21)$$

Якщо температуру вільних кінців зафіксувати: t_0 = const, то $e_{AB}(t_0) = c$, а $E_{AB}(tt_0)$ - $e_{AB}(t)$ - $c = f(t)$, тобто величина термо-ЕРС ТП буде пропорційною температурі його робочого кінця. Під час градуювання термопар температуру вільних кінців слід підтримувати сталою (зазвичай t_0= 0 °С).

Важливо зазначити, що величина термо-ЕРС не залежить від розподілення температури по довжині термоелектродів, а визначається лише різницею температур гарячого спаю та вільних кінців (варто додати, що величина термо-ЕРС визначається хімічним складом термоелектродів термопари і не залежить від їх геометричних розмірів).

Ще однією властивістю термопари (її ще називають законом проміжних металів), яка не залежить від розміру та хімічного складу термоелектродів, є те, що введення третього провідника в коло термопари не змінює сумарної термо-ЕРС, якщо кінці цього провідника мають однакову температуру .

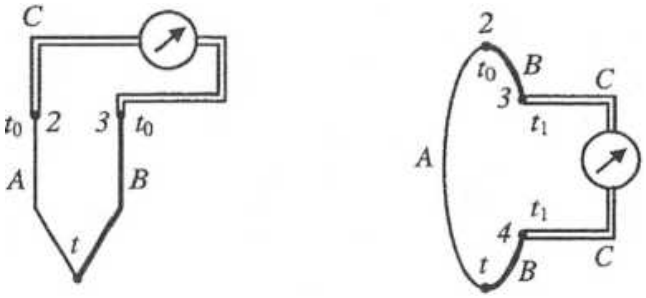
4.5.2. Увімкнення вимірювального приладу в коло термоелектричного перетворювача

Для вимірювання термо-ЕРС у контур ТП підключають вимірювальний прилад за однією з двох схем (рис. 4.17). Обидві схеми можна подати як введення в коло ТП третього провідника.

У разі підключення вимірювального приладу до роз'єднаного холодного спаю (рис. 4.17, *а*) ТП має один робочий спай 1 і два вільні кінці 2 та 3. Якщо ж вимірювальний прилад підключають до кінців розриву одного з термоелектродів (рис. 4.17, *б*), то ТП має чотири спаї: гарячий 1, холодний 2, а також нейтральні 3, 4 за постійної температури t_1. Покажемо, що, незважаючи на зовнішньо різні схеми, термо-ЕРС, які утворюються в обох випадках, будуть рівними між собою, якщо температури кінців третього провідника *C* однакові.

Для схеми підключення вимірювального приладу, зображеної на рис. 4.17, *а* , запишемо, згідно з рівнянням (4.19):

$$E_{AB}(tt_0t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) \qquad (4.22)$$



а *б*

Рис. 4.17. Схеми підключення вимірювального приладу в коло ТП

Якщо температура всіх спаїв однакова, то

$$E_{AB}(t_0t_0t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0$$

Звідси

$$e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = e_{BA}(t_0) \qquad (4.23)$$

Підставляючи рівняння (4.23) у вираз (4.22), знаходимо:

$$E_{AB}(tt_0t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}(tt_0) \qquad (4.24)$$

тобто отримане для згаданої схеми рівняння (4.24) повністю збігається з основним рівнянням ТП (4.21).

Для кола, показаного на рис. 4.11, *б*,

$$E_{ABC}(tt_1t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1) + e_{CB}(t_1) + e_{BA}(t_0) \qquad (4.25)$$

а враховуючи, що $e_{BC}(t_1) = -e_{CB}(t_1)$, $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$, зведемо вираз (4.25) до вигляду

$$E_{ABC}(tt_1t_0) = e_{AB}(t) - e_{CB}(t_1) + e_{CB}(t_1) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}(tt_0)$$

І це рівняння теж повністю збігається з основним рівнянням ТП.

Отже, у разі введення в коло ТП третього провідника за умови однаковості температур його кінців, термо-ЕРС ТП не змінюється. Це стосується будь-якої кількості провідників, увімкнених у коло ТП, і дає змогу вмикати в будь-яке місце кола ТП один або більше приладів для вимірювання термо-ЕРС, причому за допомогою провідників, які відрізняються від термоелектродів ТП.

Відзначимо, що за різної температури спаїв 2 та 3 (рис. 4.17, *а*) чи 3 та 4 (рис. 4.17, *б*) у колі утворюється паразитна термо-ЕРС.

4.5.3. Способи з'єднання термоелектричних перетворювачів

З'єднуючи в різний спосіб між собою ТП, можна для конкретних цілей вимірювання значно підвищити точність.

У разі потреби виміряти різницю температур t_1 - t_2 ТП вмикають (рис. 4.18,*а*) зустрічно (диференційно). Якщо у цій схемі $t_1 = t_2$, сумарна термо-ЕРС дорівнює нулю.

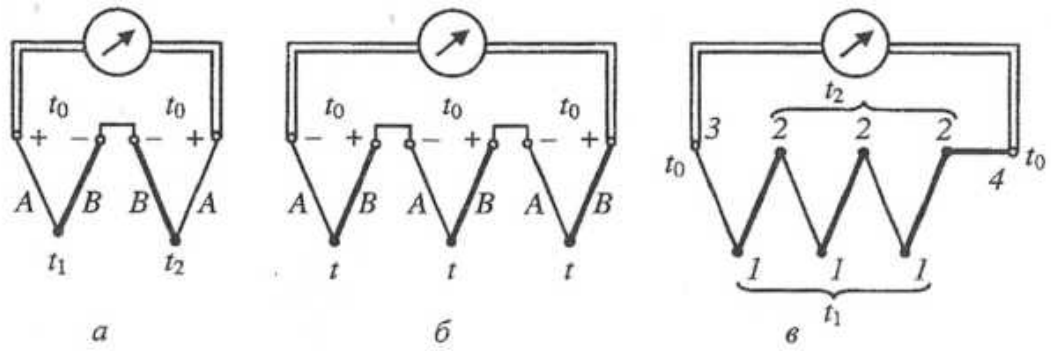


Рис. 4.18. Схеми з'єднання ТП

Для вимірювання температури *t*, яка незначно відрізняється від температури вільних кінців ТП, використовують термобатареї (рис. 4.18, *б*) з *n* послідовно з'єднаних ТП, що дозволяє в *n* разів збільшити зумовлену цією невеликою різницею температур (відповідно і термо-ЕРС окремого ТП буде невеликою) сумарну термо-ЕРС. Для вимірювання малої різниці t_1 - t_2 використовують з'єднання (рис. 4.18, *в*), у якому робочими є спаї 1 та. 2.

4.5.4. Градуювання термоелектричних перетворювачів за допомогою нормального термоелектрода

Щоб оцінити властивості ТП, складених з різних пар різнорідних термоелектродів, досить знати значення термо-ЕРС, що розвиваються цими термоелектродами в парі з одним із нормальних термоелектродів. Як нормальний зазвичай використовують термоелектрод з хімічно чистої платини.

Припустімо, що деякі термоелектроди з матеріалів *A* та *B* у парі з нормальним термоелектродом *N* утворюють термо-ЕРС відповідно $E_{AN}(tt_0)$ і $E_{BN}(tt_0)$. При цьому робочий спай кожної з пар має одну й ту ж температуру *t*, а їх вільні кінці – однакову температуру t_0. Запишемо для кожної пари *«термоелектрод ТП – нормальний термоелектрод»* основне рівняння ТП:

$$E_{AN}(tt_0) = e_{AN}(t) - e_{AN}(t_0)$$
$$E_{BN}(tt_0) = e_{BN}(t) - e_{BN}(t_0)$$

Віднімаючи з першого рівняння друге та скориставшись формулою (4.23), отримуємо

$$E_{AN}(tt_0) - E_{BN}(tt_0) = [e_{AN}(t) - e_{NB}(t)] - [e_{AN}(t_0) - e_{NB}(t_0)]$$

З урахуванням виразу (4.22) маємо

$$E_{AN}(tt_0) - E_{BN}(tt_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

Права частина рівняння являє собою формулу шуканої термо-ЕРС для ТП, складеного з термоелектродів *A* та *B*, тому остаточно можна записати

$$E_{AB}(tt_0) = E_{AN}(tt_0) - E_{BN}(tt_0) \qquad (4.26)$$

Таким чином, якщо відома термо-ЕРС двох провідників *A* та *B* у парі з третім – нормальним термоелектродом *N*, то можна за розрахунком, використовуючи рівняння (4.26), визначити значення термо-ЕРС ТП, виконаного з двох термоелектродів *A* та *B*, тобто отримати номінальну статичну характеристику цього ТП. У довідкових таблицях наводяться значення термо-ЕРС різних матеріалів у парі з платиною для $t = 100$ °С та $t_0 = 0$ °С.

Під час вимірювання температури за допомогою ТП температуру його вільних кінців слід стабілізувати (найкраще за температури градуювання ТП, тобто, якщо $t_0 = 0$ °С), оскільки без належних запобіжних заходів відхилення температури вільних кінців ТП у реальних умовах вимірювання спричинюється до появи великої - десятки чи навіть сотні градусів - похибки вимірювання. Попри безпосереднє термостатування вільних кінців ТП за температури $t_0 = 0$ °С за допомогою посудин Дюара, яке можна виконувати тільки в лабораторних умовах, існують різні методи врахування, зменшення чи навіть повного компенсування згаданої похибки.

4.5.5. Поправка на температуру вільних кінців термоелектричних перетворювачів

Якщо температура вільних кінців ТП відмінна від нуля (такою є температура градуювання промислових термопар), тобто $t_0' \neq 0$ °С, то показання вимірювального приладу за температури t робочих кінців буде відповідати термо-ЕРС, яка генерується термопарою:

$$E_{AB}(tt_0') = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0') \qquad (4.27)$$

тобто прилад покаже температуру $t - t_0'$.

Номінальна статична характеристика ТП, яку ще називають *градуювальною характеристикою* (рис. 4.19), визначає залежність термо-ЕРС від температури робочого кінця, відповідає умові, коли температура t_0 вільних кінців ТП дорівнює 0 °С.

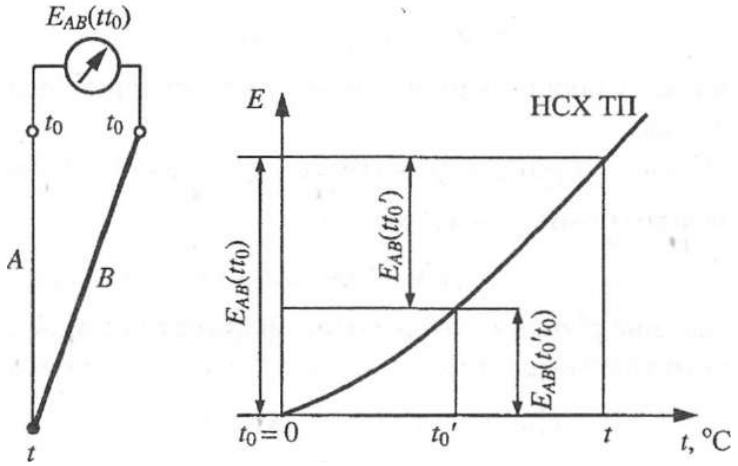


Рис. 4.19. Визначення поправки на температуру вільних кінців ТП t_0'

Якщо ця умова зберігається в процесі вимірювання, то $E_{AB}(tt_0)=e_{AB}(t)-e_{AB}(t_0)$ Віднявши від останнього виразу значення термо-ЕРС (4.27) для реальних умов вимірювання, отримаємо

$$E_{AB}(tt_0) - E_{AB}(tt_0')=[e_{AB}(t)-e_{AB}(t_0)] - [e_{AB}(t)-e_{AB}(t_0')]$$

або

$$E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt_0') + [e_{AB}(t_0')- e_{AB}(t_0)] = E_{AB}(tt_0') + E_{AB}(t_0't_0) \quad (4.28)$$

У виразі (4.28) $E_{AB}(t_0't_0)$ являє собою *поправку*, яка визначається з НСХ використаного ТП за виміряним значенням реальної температури t_0' його вільних кінців. Знайдене значення $E_{AB}(t_0't_0)$ додають до виміряного приладом значення $E_{AB}(tt_0')$ з тим же знаком, який має відхилення реальної температури вільних кінців від температури градуювання t_0 = 0 °С, тобто поправку віднімають від показань вимірювального приладу $E_{AB}(tt_0')$, якщо $t_0' < t_0$ та додають до $E_{AB}(tt_0')$, якщо $t_0' > t_0$. Скориставшись НСХ ТП, за отриманим (виправленим) значенням термо-ЕРС $E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt_0') \pm E_{AB}(t_0't_0)$ знаходять виміряну температуру t.

4.5.6. Подовжувальні та компенсаційні проводи

Для зменшення впливу температури об'єкта вимірювання на вільні кінці ТП їх необхідно перенести із зони зі значною зміною температури (на виході з об'єкта вимірювання) в зону з більш-менш стабільною температурою – наприклад, до місця монтажу вимірювального приладу, тобто у приміщення операторної або щитової. Для цього використовують подовжувальні або компенсаційні проводи (дод. 3). Подовжувальні проводи виготовлено з таких самих матеріалів, як і термоелектроди ТП, тому вони мають такі ж термоелектричні властивості, як і сам ТП (головною відмінністю є те, що подовжувальні проводи, позаяк вони працюють в умовах набагато нижчих температур, значно тонші за термоелектроди, а отже, й дешевші). Компенсаційні проводи виготовлено з інших матеріалів, ніж термоелектроди відповідного ТП. Тому їх термоелектричні властивості мають відповідати певним умовам, які дозволять місця їх підключення до вимірювального пристрою розглядати як перенесені вільні кінці ТП. Визначимо ці умови.

Термо-ЕРС, яка виникає в колі «ТП *AB* – компенсаційні проводи *F*, *D* – вимірювальний прилад ВП» (рис. 4.20), описується виразом

$$E = e_{AB}(t) + e_{BD}(t_1) + e_{DC}(t_0') + e_{CF}(t_0') + e_{FA}(t_1) \quad (4.29)$$

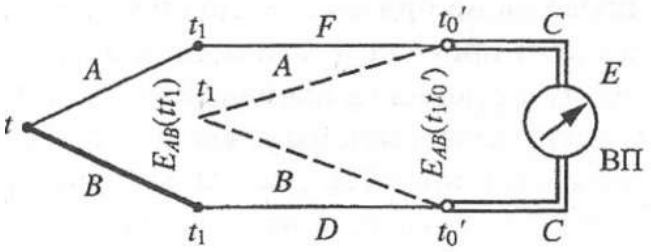


Рис. 4.20. Схема з'єднання ТП з ВП і подовжувальними чи компенсаційними проводами

Якщо припустити, що всі спаї мають однакову температуру t_1 то

$$e_{AB}(t_1) + e_{BD}(t_1) + e_{DC}(t_1) + e_{CF}(t_1) + e_{FA}(t_1) = 0. \quad (4.30)$$

Віднімаючи рівняння (4.30) від виразу (4.29), отримаємо

$$E = [\, e_{AB}(t) - e_{AB}(t_1)] + e_{DC}(t_0') + e_{CF}(t_0') - e_{DC}(t_1) - e_{CF}(t_1) =$$
$$= E_{AB}(tt_1) + [e_{DC}(t_0') + e_{CF}(t_0')] - [e_{DC}(t_1) + e_{CF}(t_1)] \quad (4.31)$$

Скориставшись рівнянням (4.23), зведемо вирази у квадратних дужках до вигляду

$$e_{DC}(t_0') + e_{CF}(t_0') = e_{DF}(t_0'); \; e_{DC}(t_1) + e_{CF}(t_1) = e_{DF}(t_1); \quad (4.32)$$

Підставляючи вираз (4.32) у рівняння (4.31), остаточно отримаємо

$$E = E_{AB}(tt_1) + e_{DF}(t_0') - e_{DF}(t_1) =$$
$$E_{AB}(tt_1) + e_{FD}(t_1) - e_{FD}(t_0') = E_{AB}(tt_1) + E_{FD}(t_1t_0') \quad (4.33)$$

Вираз (4.33) визначає значення термо-ЕРС у зображеному на рис. 4.20 колі ТП з компенсаційними проводами *F*, *D* (таким буде показання вимірювального приладу).

Якщо замість компенсаційних проводів з тією ж метою використати термоелектроди *A* та *B* (наприклад, утворити ще одну термопару, як це зображено пунктиром на рис. 4.20), то вираз (4.28) для сумарної термо-ЕРС набуде такого вигляду:

$$E = E_{AB}(tt_1) + E_{AB}(t_1t_0'). \quad (4.34)$$

Враховуючи, що заміна термоелектродів *A* та *B* у діапазоні t_1t_0' на компенсаційні проводи *F* та *D* не повинна змінювати показання вимірювального приладу – значення *E* в обох випадках має залишатися сталим (за незмінних значень t_1 і t_0') – прирівняємо вирази (4.33) та (4.34): $E_{AB}(tt_1) + E_{FD}(t_1t_0') = E_{AB}(tt_1) + E_{AB}(t_1t_0')$. Звідси

$$E_{FD}(t_1t_0') = E_{AB}(t_1t_0') \quad (4.35)$$

Із рівняння (4.35) можна сформулювати вимогу до термоелектричних властивостей компенсаційних проводів: для того щоб уведення в коло ТП компенсаційних проводів не призводило до спотворення результату вимірювання, компенсаційні проводи в діапазоні температур t_1t_0' (він значно вужчий за діапазон tt_0' і становить приблизно 100... 120 °С) повинні мати таку ж термоелектричну характеристику, яку мають у цьому діапазоні термоелектроди використовуваного ТП. Для ТП, виготовлених із благородних металів, як компенсаційні проводи зазвичай використовують мідь у парі з мідно-нікелевими сплавами.

4.5.7. Автоматична компенсація зміни термо-ЕРС, спричиненої відхиленням температури вільних кінців термоелектричних перетворювачів від температури градуювання

У промислових умовах для вимірювання температури мілівольтметрами використовують автокомпенсатор (його також називають компенсаційною коробкою), який автоматично вводить поправку на температуру відхилення реальної температури вільних кінців ТП t_0' від температури градуювання t_0 . Він являє собою незрівноважений міст із манганінових резисторів R_1 , R_2 , R_3 з та мідного $R_м$ (рис. 4.21).

Діагональ живлення містить джерело стабілізованого живлення *ДЖС,* а вимірювальна діагональ за допомогою подовжувальних або компенсаційних проводів підключена до вимірювального кола послідовно (й узгоджено за знаком) із ТП. Якщо температуру навколишнього середовища, в якому перебувають автокомпенсатор і вимірювальний прилад, дорівнює 0 °С (на таке значення t_0 зазвичай налагоджено мостову схему автокомпенсатора), міст буде в рівновазі й не впливатиме на величину термо-ЕРС ТП.

Відхилення температури середовища від 0 °С змінює величину опору мідного резистора $R_м$, чим порушує рівновагу моста, й у вимірювальній діагоналі з'являється різниця потенціалів, яка однакова за величиною, але протилежна за знаком відносно приросту термо-ЕРС ТП, зумовленого відхиленням температури його вільних кінців t_0' від температури градуювання, тобто $U_{cd} = E_{AB}(t_0't_0)$. Тому на вході вимірювального приладу $E = E_{AB}(tt_0') + U_{cd} = E_{AB}(tt_0)$. За постійної напруги джерела живлення зміною опору $R_н$ можна налагодити міст для роботи з ТП різних градуювань.

Сучасні автокомпенсувальні пристрої типу КТ забезпечують компенсацію зміни температури вільних кінців ТП в діапазоні від 0 до 50 °С для термопар різних типів з похибкою, що не перевищує ±3 °С.

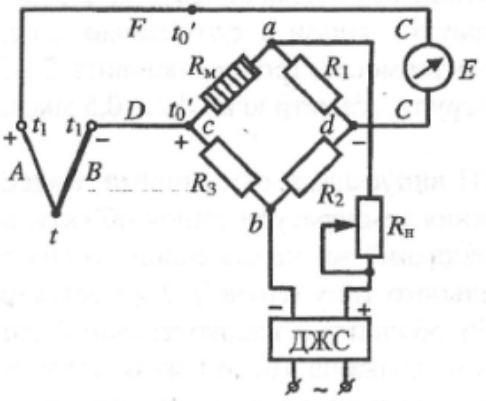


Рис. 4.21. Схема автоматичної компенсації температури вільних кінців ТП:
ДЖС – стабілізоване джерело живлення

4.5.8. Конструкція та статичні характеристики термоелектричних перетворювачів

У твердій захисній гільзі 4 (рис. 4.22) розміщено термоелектроди 2 термопари з надітими на них ізоляційними бусами 3. Спай 1 торкається дна

захисної гільзи 4 або ізолюється від нього за допомогою керамічного наконечника. До вільних кінців термоелектродів у головці 6 (на рисунку – зі знятою кришкою) приєднуються подовжувальні або компенсувальні проводи 7. Захисна гільза 4 з розміщеною в ній термопарою вводиться в об'єкт вимірювання й кріпиться на ньому за допомогою штуцера *5*.

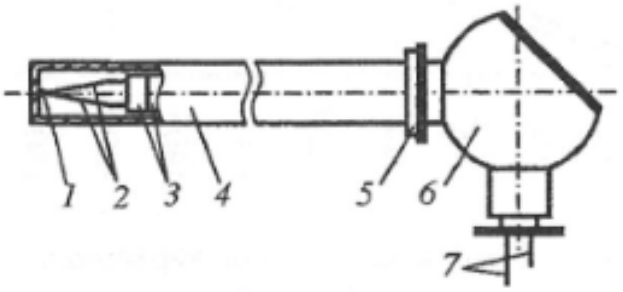


Рис. 4.22. Конструкція ТП:

1 – робочий спай; 2 – термоелектроди; 3 – ізоляційні буси; 4 – захисна гільза; 5 – штуцер; 6 – головка (без кришки); 7 – подовжувальні або компенсаційні проводи

Для забезпечення надійного контакту спай 1 виготовляють зварюванням, рідше паянням або скручуванням (для високотемпературних ТП). Захисну гільзу 3 виконують у вигляді циліндричної або конічної трубки з газонепроникних матеріалів діаметром приблизно 15...25 мм і довжиною від 100 до 2500...3500 мм (залежно від потреби об'єкта вимірювання). Матеріалом для захисної гільзи зазвичай слугують різні сталі. Для вищих температур використовують гільзи з тугоплавких з'єднань, а також кварц і порцеляну. Діаметр термоелектродів становить 2...3 мм, крім термоелектродів платинової групи, діаметр яких 0,1. ..0,5 мм, що пов'язано з їх високою вартістю.

Стандартні ТП випускають одинарними, подвійними та поверхневими - для вимірювання температури стінок об'єкта, або коли доступ усередину об'єкта ускладнений чи неможливий. Тепер дедалі ширше використовують ТП кабельного типу (гнучкі). Термоелектроди цих ТП розміщують у тонкостінній оболонці з високолегованої сталі (зовнішній діаметр оболонки 0,5...6 мм, довжина 10...30 м) й ізолюють від стінок гільзи та один від одного термостійким керамічним порошком.

Номінальні статичні характеристики ТП, тобто залежність між термо-ЕРС і температурою гарячого спаю, визначаються градуюванням ТП, і їх можна зобразити у вигляді графіків (рис. 4.23).

Наведений вигляд НСХ ТП – якісно-порівняльний, оскільки насправді вони мають незначну нелінійність; тому їх розбивають на окремі лінійні ділянки, що описуються відповідними поліномами), таблиці (див. дод. 2) або аналітичними виразами.

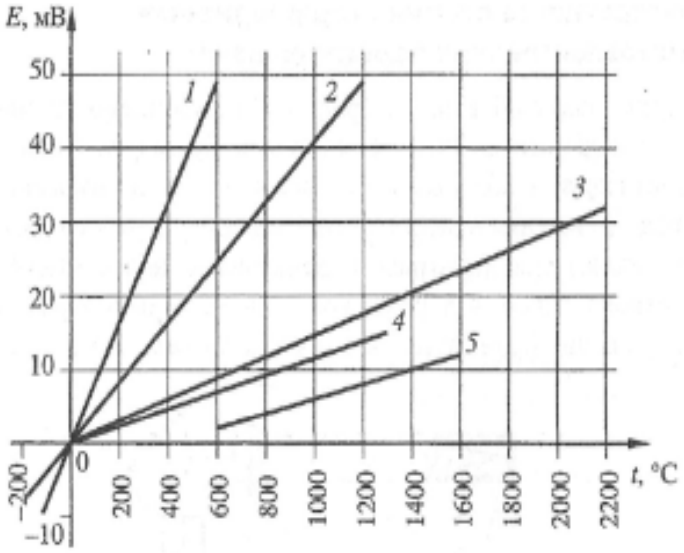


Рис. 4.23. Номінальні статичні характеристики ТП:

1 – хромель-копелевого (НСХ L); 2 – хромель-алюмелевого (К); 3 – вольфрамреній-вольфрамренієвого (А – 1); 4 – платинородій-платинового (R та S); 5 – платинородій-платинородієвого (В)

До матеріалу термоелектродів ТП ставлять такі вимоги:

– стабільність і відновлюваність термоелектричних властивостей;

– достатньо велика термо-ЕРС;

– стійкість до впливу зовнішніх чинників, зокрема жаростійкість та механічна міцність;

– хімічна інертність;

– однозначна та лінійна залежність термо-ЕРС від температури;

– висока термоелектрична однорідність матеріалу провідників по довжині, що дозволяє відновлювати робочий спай без переградуювання;

– технологічність виготовлення, що забезпечує отримання взаємозамінюваних за термоелектричними властивостями матеріалів;

– дешевизна.

Вибираючи потрібний тип ТП, слід керуватися не тільки границями вимірювання та граничнодопустимим відхиленням (для деяких ТП їх наведено в табл. 4.4 [34]), але й знати особливості поведінки матеріалів (див. дод. 2), з яких їх виготовлено, у вимірюваному середовищі.

Вольфрамреній-вольфрамренієві термопари (тип ТВР, НСХ А–1) використовують для вимірювання температури до 2500 °С у відновних і нейтральних (інертних) середовищах, а також у вакуумі. Такі ТП використовують для вимірювання температури розплавлених металів.

Платинородій-платинородієві термопари (тип ТПР, НСХ В*)* придатні для неперервної роботи в окиснювальних та нейтральних середовищах у температурному діапазоні 600... 1700 °*С.* їх також можна використовувати для виконання короткочасних вимірювань у вакуумі. Такі термопари не

рекомендується використовувати у відновному середовищі, що містить пари металів і неметалів.

Хромель-константанові термопари (тип ТХКН, НСХ Е) рекомендується використовувати в окиснювальних або нейтральних середовищах; у відновних середовищах і вакуумі вони мають такі ж обмеження, що й термопари типу К. Термопари типу Е можна використовувати для вимірювання від'ємних температур, оскільки вони не піддаються корозії під час роботи в атмосфері з підвищеним умістом вологи. Вони виробляють найбільшу серед усіх відомих типів термопар термо-ЕРС.

Залізоконстантанові термопари (тип ТЗК, НСХ J*)* підходять для роботи у вакуумі, а також у різних середовищах: і нейтральних, і окиснювальних, і відновних. За температури близко 540 °С починається процес окиснення залізних термоелектродів. Термопари типу ТЗК не рекомендується використовувати для температур, що нижчі від температури точки замерзання води через їх крихкість і схильність до іржавіння (у цьому температурному діапазоні краще працюють термопари типу ТМКН).

Хромель-алюмелеві термопари (тип ТХА, НСХ К*)* використовують для вимірювання температури в окиснювальних та повністю нейтральних середовищах; завдяки стійкості до окиснювання їх часто використовують для температур понад 540 °С. Однак ці термопари не слід застосовувати у відновній і сірнистій атмосферах, а також у вакуумі.

Хромель-копелеві термопари (тип ТХК, НСХ L) стійко працюють в окиснювальному середовищі, трохи гірше – у відновному.

Платинородій-платинові термопари (типи ТПП 13 і ТПП 10, НСХ R і *S*) призначені для неперервної роботи в нейтральних і окиснювальних середовищах в температурному діапазоні 0... 1300 °С.

Мідь-константанові термопари (тип ТМКН, НСХ Т) корозієстійкі (їх можна використовувати у вологому середовищі) і придатні для вимірювання від'ємних температур.

Динамічні властивості ТП можна описувати передавальною функцією (4.8), стала часу якої Т= 1,5...8 хв; транспортне запізнення τ = 9.. .30 с. Середня похибка вимірювання становить ±(0,5...2) %.

Таблиця 4.4.

Основні характеристики ТП

Типи ТП	Діапазон вимірюваних температур за довгочасного використання, °С	Гранична температура за короткочасного використання, °С	Граничнодопустимі відхилення НСХ, °С
ТПП 10 та ТПП 13 Клас 1	0...1300	1600	± 1 від 0 до 1100 °С включно
			± [1 +0,003(t -1100)] понад 1100... 1600 °С включно
ТПР Клас 2	600... 1600	1700	± 0,0025 |t|

			600... 1700 °С включно
ТХА Клас 1	Мінус 200... ...+1200	1300	± 1,5 мінус 45.. .+375 °С включно
			± 0,004 |t| понад 375...1000 °С включно
ТХА Клас 2	Мінус 200... ...+1200	1300	±2,5 мінус 40.. .333 °С включно
			+ 0,0075 |t| понад 333... 1200 °С включно
ТХК Клас 2	Мінус 200... ...+600	800	±2,5 мінус 40.. .300 °С включно
			± 0,0075 |t| понад 300...800 °С включно
ТХК Клас 3	Мінус 200... ...+600	800	± 0,015 |t| мінус 200...мінус 100 °С включно
			±2,5 понад мінус 100...+100 °С включно
ТВР (*А*-1) Клас 2	0...2200	2500	± 0,005 |t| понад 1000...2500 °С включно
ТВР (*А*-1) Клас 3	0...2200	2500	± 0,007 |t| понад 1000...2500 °С включно

4.6. Прилади для вимірювання термо-ЕРС

Для вимірювання термо-ЕРС використовують мілівольтметри магнітоелектричної системи, потенціометри та нормувальні перетворювачі. Промисловість виробляє потенціометри та мілівольтметри у двох конструктивних виконаннях: переносному та стаціонарному (щитові).

4.6.1. Потенціометри

В основу роботи потенціометра покладено компенсаційний метод вимірювання ЕРС, який полягає в тому, що вимірювана ЕРС (зокрема, термо-ЕРС термопари) зрівноважується відомим спадом напруги, утвореним допоміжним джерелом струму на каліброваному реохорді. Компенсувальна напруга в момент вимірювання має дорівнювати термо-ЕРС і бути спрямованою їй назустріч – при цьому стрілка нуль-приладу вказуватиме на нуль.

Розглянемо найпростішу схему вимірювання термо-ЕРС (рис. 4.24), яка складається з двох замкнених контурів: компенсувального I і вимірювального II. Електричне коло компенсувального контуру складається з джерела ЕРС і реохорда з регульованим опором $R_р$. Термопару підключають так, щоб її ЕРС була спрямована назустріч спадові напруги, створеному джерелом живлення

на реохорді. Якщо $I_п$ – струм джерела живлення потенціометра, а $I_т$ – струм термопари, то на робочій ділянці (AC) реохорда $I_{AC} = I_п + I_т$

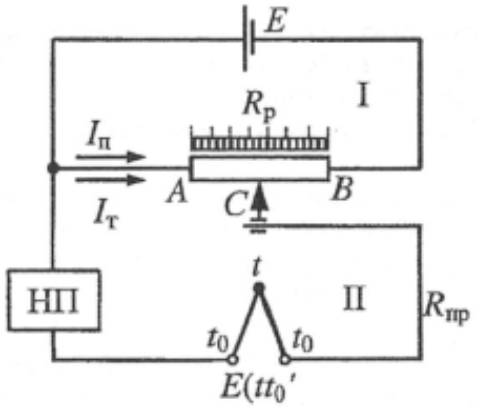


Рис. 4.24. Компенсаційна схема вимірювання термо-ЕРС

На підставі другого закону Кірхгофа для контуруII запишемо

$$E\,(tt_0') = I_T\,(R_T + R_{ПР} + R_{НП} + R_{AC}) + I_п R_{АС},$$

де $R_T + R_{ПР} + R_{НП} + R_{AC}$ – опори відповідно термопари, з'єднувальних провідників, нуль-приладу і робочої ділянки реохорда.

Позначивши $R_T + R_{ПР}$ через $R_{зв}$, отримаємо

$$E\,(tt_0') = I_т\,(R_{ЗВ} + R_{НП} + R_{АС}) + I_п R_{АС},$$

звідки

$$I_т = (E(tt_0') - I_п R_{АС})/(R_{ЗВ} + R_{НП} + R_{АС})$$

Положення ковзного контакту реохорда потрібно змінювати так, щоб у момент вимірювання (рівноваги) $I_т = 0$. Тоді

$$E\,(tt_0') = I_п R_{АС} \qquad (4.36)$$

тобто вимірювана термо-ЕРС дорівнює, спадові напруги на ділянці $A\ C$ реохорда. Якщо струм підтримувати постійним, то, як випливає з рівняння (4.36), значення напруги, яке знімають з реохорда, залежатиме тільки від опору робочої ділянки реохорда $R_{АС}$.

Отже, постає дуже важлива вимога до сталості значення струму джерела живлення, контролювати яке потрібно регулярно. Цього можна досягти, доповнивши схему контрольним колом нормального елемента *НЕ* (елемент Вестона), ЕРС якого за короткочасного навантаження залишається сталою, що дозволяє застосовувати його для контролю робочого струму потенціометра (рис. 4.25).

Гальванічний елемент Вестона - загальновизнаний еталон ЕРС. Існує два типи елементів Вестона – насичені та ненасичені. Обидва містять два електроди: позитивний зі ртуті та негативний – із кадмієво-ртутної амальгами, що містить 10 % кадмію. Електричні виводи електродів мають вигляд спіралей із платинового дроту, впаяних у скляні колби електродів. Електроліт являє собою розчин сульфату кадмію із залишком кристалів сульфату кадмію, що підтримують розчин у насиченому стані.

Насичений елемент Вестона має напругу, котра визначається за формулою

$$E_{20} = 1{,}018636 - 6{,}0\ 10^{-4} N - 5{,}0\ 10^{-5} N^2,$$

де E_{20} – ЕРС нормального елемента за температури 20 °С; N - нормальність окисненого розчину (для його окиснення найчастіше додають невелику кількість сірчаної кислоти). Зазвичай N становить 0,04.. .0,08.

Насичений елемент Вестона характеризується відносно невеликим температурним коефіцієнтом (39, 4 мкВ/°С за температури 20 °С), тому зазвичай працює у повітряному або масляному термостаті, що підтримує температуру з точністю до 0,001 °С. Значення напруги елемента за будь-якої температури і визначають з виразу

$$E_1 = E_{20} - 4{,}06\cdot10^{-5}\,(t-20) - 9{,}5\cdot10^{-7}(t-20)^2 + 1{,}0\cdot10^{-8}(t-20)^3$$

Дрейф напруги насиченого елемента Вестона не перевищує мінус 1 мкВ/рік.

Ненасичений елемент Вестона конструктивно подібний до насиченого, за винятком того, що концентрація електроліту насичується за температури 4 °С, тобто за нормальної кімнатної температури елемент залишається ненасиченим. Ненасичений елемент має більшу похибку, ніж насичений (приблизно 0,005 %), але й нижчий температурний коефіцієнт (менший ніж 10 мкВ/°С). Він конструктивно простіший, більш міцний і є ідеальним переносним вторинним або робочим еталоном у промислових лабораторіях. Діапазон напруг ненасичених елементів змінюється від 1,0186 до 1,0194 В. Точне значення напруги за заданої температури вказується на елементі під час його калібрування. Зміна напруги елемента становить 0,01 % зарік.

Для виставляння робочого струму перемикач *П* переводять у положення контролю *«К»*. У колі потенціометра виникає струм $I_{\text{п}}$. Якщо його значення дорівнює розрахунковому, то спад напруги на опорі $R_{\text{НЕ}}$ буде дорівнювати ЕРС *НЕ:*

$$I_{\text{п}} = U_{\text{НЕ}} / R_{\text{НЕ}} \qquad (4.37)$$

При цьому нуль-прилад показуватиме нуль.

Якщо рівність (4.37) не дотримується, то її досягають переміщенням повзунка на $R_б$ доти, доки стрілка нуль-приладу не встановиться на позначці нуль. Після цього перемикач *П* переводять у положення вимірювання *«В»* - потенціометр підготовлено до вимірювання.

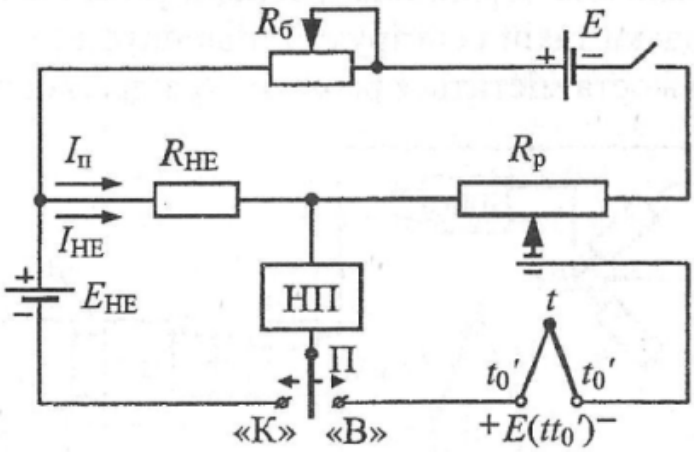


Рис. 4.25 Принципова схема лабораторного потенціометра

Автоматичні потенціометри. В електронних автоматичних потенціометрах повзунок реохорда переставляє РД, а роль нуль-приладу виконує електронний підсилювач.

В автоматичних потенціометрах для вимірювання термо-ЕРС застосовують мостову схему, що складається з чотирьох плечей – $R_н$, $R_м$, $R_к$, $R_б$ (рис.4.26). У вершині *c* моста поміщено калібрований реохорд $R_р$. Вимірювана напруга $E_{AB}(tt_0')$ зрівноважується різницею потенціалів у точках *c* і *d*, яку можна змінювати, переміщуючи ковзний контакт на реохорді.

Такий потенціометр – це стаціонарний прилад, який одночасно показує і записує вимірювання на дискову або стрічкову діаграму. Усі опори вимірювальної схеми, крім терморезистора $R_м$, виготовлені з манганіну.

Якщо вимірювана ЕРС термопари $E_{AB}(tt_0')$ не дорівнює компенсувальній напрузі $U_к=U_{cd}$, то напруга розбалансу $\Delta U= E_{AB}(tt_0')-U_{cd}$ подається на вхід електронного напівпровідникового підсилювача змінного струму, що складається з вхідного пристрою (модулятора), який перетворює сигнал постійної напруги $\pm\Delta U$ в сигнал змінного струму, та фазочутливого електронного підсилювача змінного струму ЕП.

Електронний підсилювач через ОК керує роботою РД, який, обертаючись в один або другий бік (залежно від знака сигналу розбалансу ΔU), зміщує повзунок реохорда, відновлюючи рівновагу схеми. Реверсивний двигун одночасно переміщує стрілку відлікового пристрою та перо самописа. Діаграмну стрічку протягує синхронний двигун *СД.*

Сучасні автоматичні потенціометри не мають механізму контролю робочого струму, оскільки для їх живлення використовують стабілізоване джерело *ДЖС,* яке живиться напругою 6,3 В змінного струму. Це спрощує конструкцію та підвищує надійність приладу. На виході *ДЖС* напруга становить 5 В постійного струму. Резистором R_1 напругу живлення вимірювальної схеми потенціометра від джерела стабілізованого живлення знижують з 5 В до 1 В.

Вимірювальну схему потенціометра виконано у вигляді незрівноваженого моста з плаваючою вершиною: реохорд розміщено у двох

суміжних плечах моста. Завдяки такій конструкції підвищується чутливість мостової схеми. У вершині моста міститься реохорд $R_Р$ з двома шунтами – $R_в$ і $R_ш$.

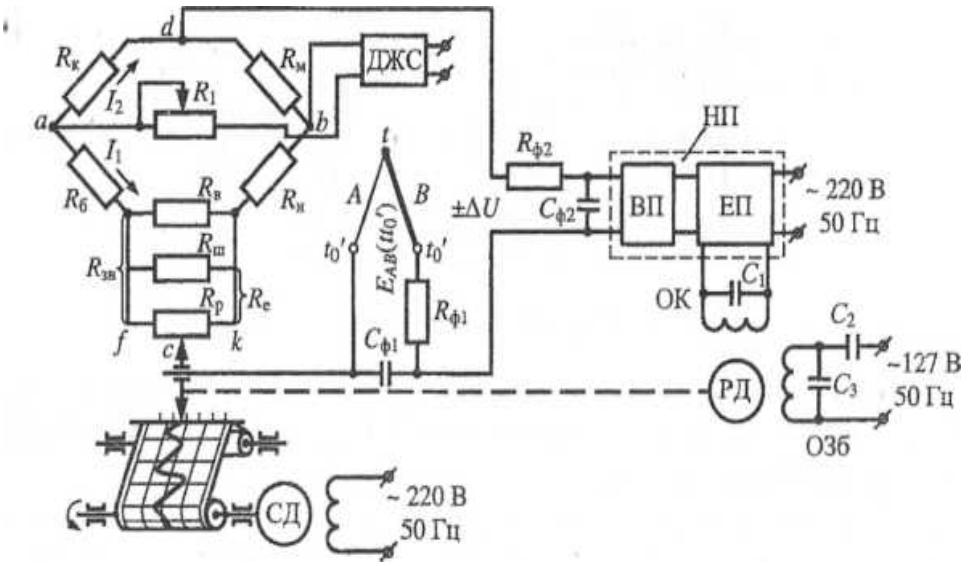


Рис. 4.26 Принципова схема автоматичного потенціометра:
ВП – віброперетворювач (модулятор)

Якщо треба змінити опір на ділянці *fk* у разі зміни діапазону вимірювання, змінюють загальний опір $R_{зв}$ цієї ділянки за рахунок зміни $R_в$ (інколи зміни $R_ш$), залишаючи при цьому $R_Р$ стандартним. Резистор $R_ш$ дає змогу довести еквівалентний опір реохорда разом із шунтом $R_е=R_РR_ш/(R_Р+R_ш)$ до стандартного значення (90 Ом), а шунт $R_в$ дозволяє змінити діапазон вимірювань. Змінюючи опір $R_н$, виставляють початкове значення шкали потенціометра, а шунтом $R_в$ змінюють діапазон вимірювання. Контрольний резистор $R_к$ слугує для контролю робочого струму вимірювальної схеми $U_к=I_2R_к$ під час перевірки та градуювання потенціометра (зазвичай $R_к$=509,3 Ом, а I_2=2 мА), баластним опором $R_б$ виставляють для різних градуювань певне значення опору гілки *acb,* а отже, й значення робочого струму I_1=3 мА. Резистори $R_{ф1}$, $R_{ф2}$ та конденсатори $C_{ф1}$, $C_{ф2}$ утворюють фільтри для усунення наведень від сторонніх електричних полів. Решта елементів схеми мають таке ж призначення, що й відповідні елементи автоматичних мостів.

Застосування мостової вимірювальної схеми в автоматичних потенціометрах забезпечує можливість автоматичного введення поправки на відхилення температури вільних кінців ТП t_0' від температури градуювання t_0=0°С.

Відбувається це так. Вимірювана термо-ЕРС $E_{AB}(tt_0')$ компенсується потенціалом розбалансу моста $U_к=U_{cd}$, тобто

$$E_{AB}(tt_0') = U_{cd} = I_1(R_{зв} + R_н) - I_2R_м, \qquad (4.38)$$

де $R_{зв}=R_сR_в/(R_с+R_в)$ - зведений опір реохорда.

Якщо температура вільних кінців ТП зміниться (наприклад, збільшиться) на величину $\Delta t_0=t_0'-t_0$, то ЕРС ТП зменшиться на $\Delta e = E_{AB}(t_0\, t_0')$. При цьому збільшиться і спад напруги на резисторі $R_м$ оскільки він виготовлений з міді або нікелю, і його опір змінюється пропорційно зміні температури t_0'. Тому рівняння компенсації (4.38) набуде вигляду

$$E_{AB}(tt_0') = I_1(R_{зв} + R_н) - I_2(R_M + \Delta R_M),$$

де $\Delta R_м$ – температурний приріст опору $R_м$.

Щоб за незмінної температури робочого кінця ТП t та будь-якої температури її вільних кінців t_0' не зміщувався повзунок реохорда $R_Р$ і не змінювалося показання приладу, тобто щоб величина розбалансу $\Delta U=0$, необхідно забезпечити рівність

$$I_2\Delta R_м = E_{AB}(t_0' t_0), \qquad (4.39)$$

тобто температурний приріст спаду напруги на $R_м$ має чисельно дорівнювати поправці до термо-ЕРС $E_{AB}(tt_0')$ на відхилення Δt_0 температури вільних кінців ТП від температури градуювання t_0=0°С.

Якщо це так, то сума $E_{AB}(tt_0')+I_2\Delta R_м$ дорівнюватиме $E_{AB}(tt_0')+ E_{AB}(t_0't_0)$ і дасть термо-ЕРС термопари з урахуванням поправки на дійсну температуру t_0' її вільних кінців, тобто $E_{AB}(tt_0)$.

Рівняння компенсації остаточно набуде вигляду

$$E_{AB}(tt_0) = I_1(R_{зв} + R_н) - I_2R_м.$$

Значення опору терморезистора $R_м$ для t_0= 0 °С визначають із рівняння (4.34), враховуючи, що значення $\Delta R_м$ у ньому дорівнює $\Delta R_м=R_м\alpha(t_0'-t_0)$

Таким чином,

$$R_м = \frac{E_{AB}(t_0' t_0)}{\alpha I_2(t_0'-t_0)},$$

де α – температурний коефіцієнт електричного опору міді; t_0' = 50 °С.

У сучасних автоматичних потенціометрах немає механізму контролю та встановлення робочого струму, оскільки для їх живлення використовують *ДЖС*.

Автоматичні потенціометри різних груп відрізняються конструкцією, габаритами, видом діаграмного паперу, а також функціональними ознаками: часом проходження шкали покажчиком (від 1 до 10 с), кількістю точок вимірювань (1, 3, 6, 12), видом допоміжного пристрою. Якщо їх використовують для регулювання та сигналізації, то їх оснащують такими ж допоміжними пристроями, як і автоматичні мости.

4.6.2. Мілівольтметри

Мілівольтметри – прилади магнітоелектричної системи, робота яких ґрунтується на взаємодії провідника зі струмом і поля постійного магніту. Поле створює сильний постійний магніт (рис. 4.27), а провідником слугує

рамка, що складається зі значної кількості витків тонкого ізольованого мідного або алюмінієвого дроту.

Рухома система приладу складається з мідної рамки з жорстко прикріпленою до неї стрілкою. Найчастіше рамку закріплено на кернах 5, які спираються на підп'ятники 4 з агату або рубіну (виробляють прилади як з горизонтальною, так і з вертикальною осями обертання). У реєструвальних приладах рамку зазвичай підвішують на тонких стрічкових розтяжках з фосфористої бронзи.

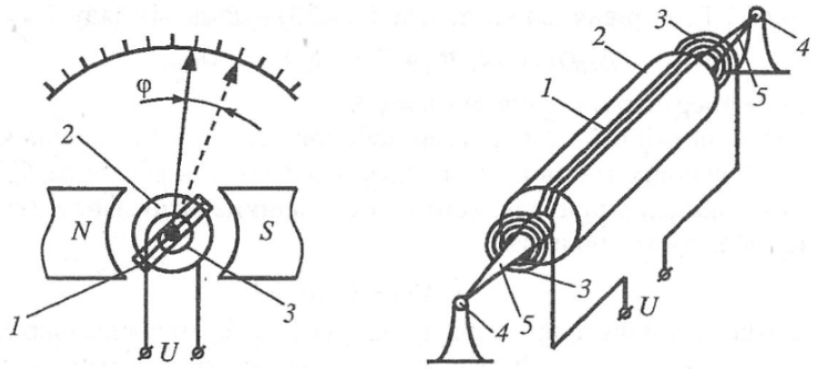


Рис. 4.27. Принципова схема мілівольтметра:
1– рамка; 2 – циліндричне осердя з м'якої сталі; 3 – спіральні пружини; 4 – підп'ятники; 5 – керни

Струм підводиться через спіральні пружини або безпосередньо через стрічки розтяжок. Обертальний магнітоелектричний момент, який виникає під час проходження струму через рамку, визначають як

$$M_{\text{ме}} = 2rlnBI,$$

де $2r$ – радіальна ширина рамки, см; l - активна довжина рамки, см; n – кількість витків; B – магнітна індукція, Тл; I – струм, А.

Під дією моменту $M_{\text{ме}}$ (напрям дії визначають за правилом лівої руки) рамка повертається, закручуючи спіральні пружини, які створюють момент протидії $M_{\text{п}}$, пропорційний кутові повороту рамки φ та модуля пружності матеріалу пружини:

$$M_{\text{п}} = w\varphi,$$

де w – питомий протидійний момент пружин, Н·м/град.

У момент рівноваги рухомої системи мілівольтметра $M_{\text{ме}} = M_{\text{п}}$, а отже,

$$2rlnBI = w\varphi$$

Звідси

$$\varphi = S_I I, \qquad (4.40)$$

де $S_I = 2rlnB/w$ – чутливість мілівольтметра до струму, град/А.

Враховуючи залежність струму *I,* що проходить через рамку, від напруги *U* і внутрішнього опору мілівольтметра $R_{мв}$($I=U/R_{мв}$), з виразу (4.40) отримаємо залежність кута повороту рамки ф від вимірюваної напруги:

$$\varphi = S_1 U / R_{мв} = S_U U \,,$$

де

$$S_U = S_1 / R_{мв} \qquad (4.41)$$

– чутливість мілівольтметра до напруги, град/В.

Термо-ЕРС вимірюють мілівольтметром за схемою, показаною на рис. 4.28. Генерована ТП термо-ЕРС $E_{AB}(tt_0')$ створює у замкненому вимірювальному колі струм

$$I = E_{AB}\left(\mathrm{tt}_0'\right)/(R_{AB} + R_{FD} + R_{п} + R_{у} + R_{р} + R_{д}) = \frac{E_{AB}(tt'_0)}{R_{ЗВ}+R_{МВ}}, \qquad (4.42)$$

де R_{AB}, R_{FD}, $R_{п}$, $R_{у}$, $R_{р}$, $R_{д}$, – опори відповідно термоелектродів *A* і *B,* подовжувальних або компенсувальних провідників *F* і *D* з'єднувальних проводів $R_{п}$, підгінного резистора (котушки) $R_{у}$, рамки $R_{р}$ та додаткової котушки $R_{д}$ мілівольтметра; $R_{зв} = R_{AB} + R_{FD} + R_{п} + R_{у}$ – зовнішній відносно вхідних клем *ab* приладу опір вимірюваного кола; $R_{мв} = R_{р} + R_{д}$ – внутрішній опір мілівольтметра.

З урахуванням рівняння (4.42) вираз для визначення підведеної до клем *ab* мілівольтметра вимірюваної напруги *U* матиме вигляд

$$U = IR_{мв} = E_{AB}(tt'_0)R_{мв}/R_{зв} + R_{мв}.$$

Після почленного ділення чисельника та знаменника на $R_{мв}$ остаточно отримаємо

$$U = E_{AB}(tt'_0)/(1 + R_{зв}/R_{мв}). \qquad (4.43)$$

Із рівняння (4.43) видно, що вплив коливань температури зовнішнього середовища буде тим меншим, чим менше відношення $R_{зв}/R_{мв}$. Зменшити $R_{зв}/R_{мв}$ можна лише збільшивши $R_{мв}$. А позаяк мідна рамка мілівольтметра має відносно малий опір, то $R_{мв}$ збільшують за допомогою послідовно з'єднаного з рамкою додаткового резистора опором $R_{д}$, виготовленого у вигляді манганінової котушки.

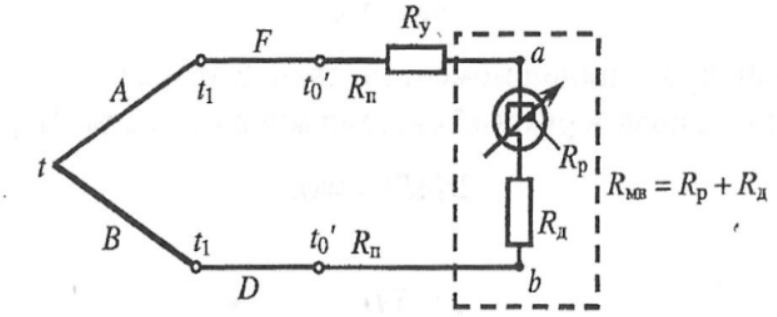


Рис. 4.28. Схема вимірювання термо-ЕРС мілівольтметром

Проте, як видно з рівняння (4.41), збільшення $R_{мв}$ призводить до зниження чутливості S_U мілівольтметра. Тому зазвичай $R_{мв}$=100...500 Ом, а відношення $R_р$ / $R_{мв} \leq 1/3$, що дозволяє значно зменшити температурний коефіцієнт приладу. Значення зовнішнього опору вимірюваного кола $R_{зв}$ стандартизоване в межах 0,6...25 Ом і вказується на шкалі мілівольтметра. До цього значення $R_{зв}$ підганяють за допомогою котушки $R_у$.

Шкалу мілівольтметрів градуюють у градусах і мілівольтах або тільки в градусах.

Для забезпечення автоматичної компенсації відхилень температури вільних кінців ТП t_0' від температури градуювання t_0 під час вимірювання термо-ЕРС мілівольтметром використовують подовжувальні або компенсувальні проводи (дод. 3) разом з автокомпенсаторами.

4.7. Нормувальні перетворювачі

Нормувальні перетворювачі призначені для перетворення вихідних сигналів первинних перетворювачів, що не мають уніфікованого сигналу ЕРС постійного струму (стандартні ТП і ТО) та вихідного сигналу змінного струму (манометри, дифманометри та інші з вихідними ДТП або ММП) в уніфікований сигнал постійного струму. Особливої актуальності такі датчики набувають у системах автоматичного контролю та керування − АСУ ТП та ІВС, оскільки мікропроцесорні системи в основному працюють з уніфікованими сигналами 0…5 і 4…20 мА.

Нормуючий перетворювач НП виконує наступні функції:

перетворює нестандартний неуніфікований сигнал наприклад, mV, Ом в стандартний уніфікований вихідний сигнал;

здійснює фільтрацію вхідного сигналу;

здійснює лінеаризацію статичної характеристики датчика;

стосовно термопари, здійснює температурну компенсацію холодного спаю.

Нормуючий перетворювач застосовується також в наступних випадках:

коли необхідно подати сигнал вимірюваної величини на декілька вимірювальних або регулюючих пристроїв;

коли необхідно передати сигнал на великі відстані − наприклад сигнал від термопари передається на малі відстані – до 10 м, а уніфікований сигнал постійного струму може передаватися на великі відстані − до 100 м.

Розглянемо структурну схему одного з можливих варіантів нормувальних перетворювачів (рис. 4.29). Вхідний сигнал напруги постійного струму =$U_{вх}$ після алгебричного підсумовування із сигналом зворотного зв'язку ($\Delta U=U_{вх}-U_{з.з}$) у пристрої порівняння перетворюється модулятором у сигнал змінного струму, котрий підсилюється ЕП і знову перетворюється демодулятором у сигнал постійного струму. Вихідний сигнал з демодулятора у вигляді постійного струму чи постійної напруги надходить на вихід

перетворювача та на ПЗЗ. Модулятор і демодулятор живляться від умонтованого генератора.

Як модулятор зазвичай використовують магнітний підсилювач, спрощена схема якого може мати вигляд, який показано на рис. 430, *а*. Під час проходження постійного струму Івх через обмотку W1 виникає магнітний потік Ф1, який буде підмагнічувати магнітопровід 1. Залежно від величини та спрямованості цього потоку (а отже, й від величини та знака сигналу постійного струму у вигляді напруги = Uвх або струму = Івх) буде відповідно змінюватися амплітуда і фаза вихідного сигналу змінного струму ~Uвих.

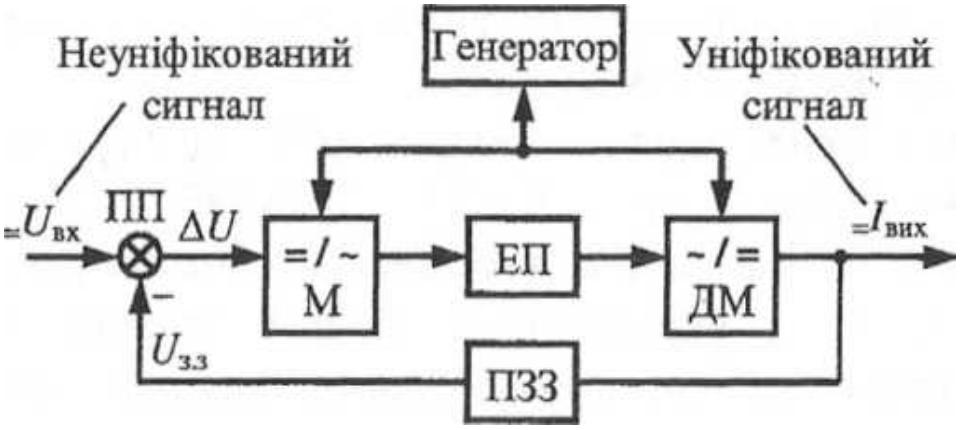


Рис. 4.29. Структурна схема нормувального перетворювача:
ПП – пристрій порівняння; М – модулятор; ДМ – демодулятор

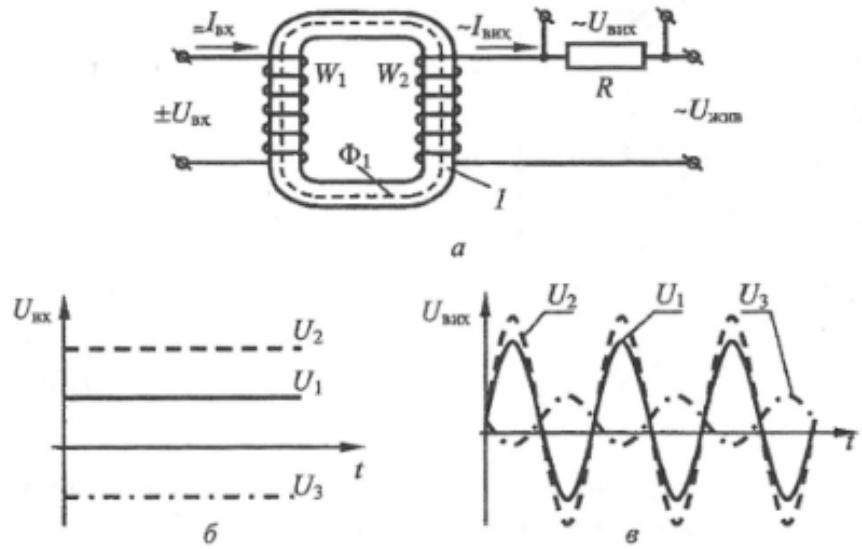


Рис. 4.30. Спрощена схема (а) та діаграми вхідного (б) й вихідного (в) сигналів магнітного підсилювача (дроселя насичення)

Фаза й амплітуда $\sim U_{вих}$ визначаються знаком та величиною $U_{вх}$, тобто відбувається модулювання вхідного сигналу постійного струму в сигнал змінного струму (рис. 4.30, *б*, *в*).

Для усунення недоліків, притаманних магнітному підсилювачу, зображеному на рис. 4.30, *а* (його вихідний сигнал може впливати на вхідний, а форма вихідного струму суттєво відрізняється від синусоїди), використовують конструкцію з двома ідентичними магнітопроводами з відповідною подвоєною кількістю обмоток на них.

Нормувальні перетворювачі термо-ЕРС. Ці перетворювачі використовують для введення інформації з ТП в ЕОМ або в систему автоматизованого керування. Їх призначено для перетворення сигналу ТП (термо-ЕРС постійного струму) в уніфікований сигнал постійного струму 0...5, 0(4)...20 мА (деякі моделі нормувальних перетворювачів – у сигнал 0...10В).

В основу роботи нормувальних перетворювачів (рис. 4.31) покладено компенсаційний метод вимірювання термо-ЕРС з використанням схеми потенціометра зі змінним значенням робочого струму.

Такі потенціометри називають безреохордними (у них змінний компенсаційний спад напруги створюється не зміненням опору реохорда, через який проходить струм елемента живлення $I_б$ строго фіксованої величини, а навпаки, використовується постійний опір $R_{КН}$, а змінність компенсаційної напруги забезпечується зміненням робочого струму).

Структурно схема нормувального перетворювача аналогічна схемі «класичного» потенціометра і складається з двох контурів: контуру вимірювання I і контуру компенсації II. Контур I містить коригувальний (незрівноважений) міст, підсилювач П1 зі струмовим виходом та резистор $R_{КН}$. До контуру I за допомогою подовжувальних проводів *F* і *D* підключено термопару *AB*.

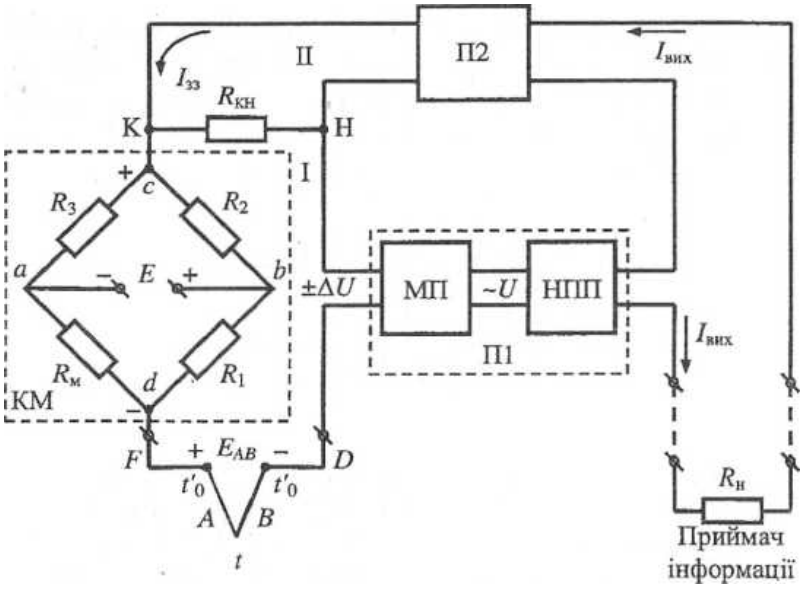


Рис. 4.31. Схема нормувального струмового перетворювача, призначеного для роботи в комплекті з ТП:

КМ – коригувальний міст; МП – магнітний підсилювач; НПП – напівпровідниковий підсилювач постійного струму

Коригувальний міст призначено для автоматичного введення поправки на зміну температури вільних кінців (холодного спаю) ТП та компенсації початкової термо-ЕРС у перетворювачах, нижня границя вимірювання яких відмінна від 0 °С. Резистори R_1, R_2 та R_3 – манганінові, $R_м$ – мідний. Підсилювач П1 складається з двох каскадів: магнітного підсилювача, виконаного за двотактною двопівперіодною схемою, та напівпровідникового підсилювача, який працює в режимі підсилення постійного струму. Підсилювач П1 виконує роль нуль-індикатора.

Контур компенсації II містить резистор $R_{КН}$ та підсилювач зворотного зв'язку П2, який аналогічний підсилювачу П1, але має глибокий зворотний зв'язок за вихідним струмом підсилювача. Вихідний струм $I_{3.3}$ підсилювача П2 є робочим струмом контуру II, що створює на резисторі $R_{КН}$ компенсаційний спад напруги $U_{КН} = I_{3.3} R_{КН}$. Із боку контуру I до резистора $R_{КН}$ підводиться сигнал ТП $E_{АВ}(tt_0')$, просумований із напругою U_{cd}, сформованою у вимірювальній діагоналі cd коригувального моста. Ця напруга дорівнює поправці на температуру вільних кінців ТП, тобто $U_{cd} = E_{AB}(t_0' t_0)$. Таким чином, сумарний сигнал $E_{AB}(t_0' t_0)+U_{cd}$ який дорівнює $E_{AB}(tt_0')$, порівнюється з компенсаційною напругою $U_{КН}$.

Напруга розбалансу $\Delta U = E_{AB}(tt_0) - U_{КН}$ подається на підсилювач П1, де цей сигнал постійного струму спочатку перетворюється в магнітному підсилювачі (модуляторі) у сигнал змінного струму, який, підсилившись, знову перетворюється в сигнал постійного струму. Останній додатково підсилюється в напівпровідниковому підсилювачі постійного струму.

Вихідний сигнал підсилювача П1 створює струм $I_{вих}$, який надходить у зовнішнє коло, тобто на приймач інформації $R_н$ а далі через подільник (на рис. 4.31 не показано) – у підсилювач зворотного зв'язку П2. Вихідний струм $I_{з.з}$ підсилювача П2 змінюється і змінює спад напруги $U_{КН}$ на резисторі $R_{КН}$ доти, доки небаланс ΔU не зменшиться до деякої малої величини δU, яку називають ***статичною похибкою компенсації.***

Наявність δU призводить до появи в контурі вимірювання I недокомпенсованого струму, який буде тим більший, чим більша вимірювана термо-ЕРС, тобто пропорційний величині $E_{АВ}(tt_0)$.

Позбавитися цієї похибки в пристрої, виконаному за статичною автокомпенсаційною схемою, принципово неможливо, бо вихідний струм $I_{вих}$ перетворювача та струм контуру компенсації $I_{з.з}$ визначаються наявністю цієї похибки і пропорційні їй.

Розглянемо зв'язок між вимірюваною термо-ЕРС $E_{АВ}(tt_0)$ та вихідним струмом $I_{вих}$ нормувального перетворювача. Як зазначалося,

$$\Delta U = E_{AB}(tt_0) - U_{КН}. \qquad (4.44)$$

На виходах підсилювачів П1 і П2 формуються сигнали

$$I_{вих} = k_1 I_{вх} = k_1(\Delta U / R_{вх}); \qquad (4.45)$$

$$I_{з.з} = k_2 I_{вих}, \qquad (4.46)$$

де k_1, k_2 – коефіцієнти підсилення П1 і П2; $I_{вих}=\Delta U/R_{вх}$ - струм, утворюваний у вхідному колі підсилювача $П_1$ сигналом ΔU; $R_{вх}$ - опір вхідного кола підсилювача П1.

Спад напруги на резисторі $R_{КН}$ з урахуванням рівняння (4.46) становитиме

$$U_{КН} = I_{з.з}R_{КН} = k_2 I_{вих}R_{КН}. \quad (4.47)$$

Підставляючи у вираз (4.44) ΔU із (4.45) і $U_{КН}$ із рівняння (4.47), отримаємо

$$I_{вих}(R_{вх}/k_1) = E_{АВ}(tt_0) - k_2 I_{вих}R_{КН},$$

звідки остаточно

$$I_{вих} = kE_{АВ}(tt_0). \quad (4.48)$$

де $k = 1 / (R_{вх}/k_1+k_2\ R_{КН})$ - коефіцієнт перетворення нормувального перетворювача (якщо $k_1\to\infty$, то $k = =1/ (k_2/R_{КН})$).

Таким чином, струмовий вихідний сигнал нормувального перетворювача пропорційний сигналові ТП, скоригованому за температурою t_0' вільних кінців.

Залежно від діапазону вхідного сигналу нормувальні перетворювачі, що працюють у комплекті з ТП, мають клас точності 0,4... 1,0.

Нормувальні перетворювачі для ТО. Для введення інформації, отриманої за допомогою ТО, в ЕОМ чи системи автоматичного контролю використовують нормувальні струмові перетворювачі (рис. 4.32), які формують на виході сигнал постійного струму 0...5, 0(4)...20 мА; 0... 10 В.

На відміну від попереднього нормувального перетворювача у цьому нормувальному перетворювачі замість коригувального моста використовують вимірювальний незрівноважений міст, в одне плече якого за трипровідною схемою підключено ТО R_t. Усі інші резистори схеми - манганінові. Опори $R_л$ призначено для підганяння опору з'єднувальних проводів до номінального значення.

Вихідний струм перетворювача $I_{вих}$ пропорційний напрузі U_{cd} у вимірюваній діагоналі моста (аналогічно (4.48)):

$$I_{вих} = kU_{cd}.$$

Позаяк $U_{cd}=k_м\ R_t$, де $k_м$ - коефіцієнт перетворення моста, то

$$I_{вих} = k\ k_м R_t = K\ R_t\ ,$$

тобто вихідний сигнал $I_{вих}$ нормувального перетворювача пропорційний опорові R_t.

Класи точності цих нормувальних перетворювачів – 0,25... 1,0.

Приладобудівна промисловість України виробляє широку гаму нормувальних пристроїв від одноканальних перетворювачів до багатоканальних блоків перетворення сигналів:

– перетворювачі типів Ш78 і Ш79 - здійснюють лінійне перетворення вхідних сигналів відповідно термо-ЕРС ТП і термоопору ТО в уніфікований сигнал постійного струму 0...5 мА чи напруги 0...10 В; вони припускають

довготривале перевантаження на вході (до 25 % від діапазону вимірювання), коротке замикання кола навантаження та його обривання;

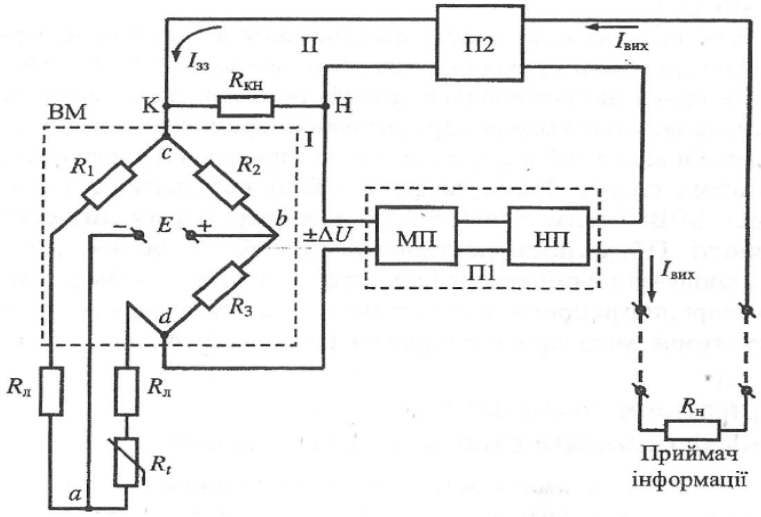


Рис. 4.32. Схема нормувального струмового перетворювача, призначеного для роботи в комплекті з ТО:
ВМ - вимірювальний міст

– багатомежові перетворювачі типу П282 - мають п’ять різновидів: П282 та П282Б призначені для роботи у комплекті з ТП, П282А та П282В – для роботи у комплекті з ТО, П282Г – для роботи у комплекті з ПВП, у яких вихідний сигнал постійної напруги 0...10, –10...10, 0...50, 0...100 мВ, та 0...10, 1...5 В чи струму 0...5 і 0(4)...20 мА; ці перетворювачі мають іскробезпечне виконання (крім П282Г), забезпечують сигналізацію про досягнення заданих верхнього та нижнього рівнів і сигналізацію про обривання кола ПВП;

– багатомежові перетворювачі типу П292 – використовують як автономні засоби у системах локальної та комплексної автоматизації технологічних процесів, а завдяки наявності інтерфейсного зв’язку забезпечують обмін інформацією з ПЕОМ (кількість гальванічно розділених каналів – 16);

– блоки перетворення сигналів ТО типів БПО-32 і БПО-42 та сигналів ТП типу БПТ-22 в уніфікований сигнал постійного струму 0...5 і 0(4)... 20 мА та ін.

Для забезпечення можливості використання в системах контролю та керування вимірювачів з вихідним сигналом змінного струму (здебільшого використовуються диференціально-трансформаторні перетворювачі) були розроблені як додаткові блоки нормувальних перетворювачів для перетворення сигналів виміряної інформації цих вимірювачів в уніфікований сигнал постійного струму. Таким, зокрема, є блок перетворення взаємної індуктивності БПВІ-1 (клас точності 0,25), який перетворює сигнал взаємної індуктивності ДТП у сигнал постійного струму 0...5 або 0(4)...20 мА. Це дає змогу сполучати вимірювальні пристрої із вихідним сигналом змінного струму з вторинними приладами постійного струму, вимірювальними блоками регуляторів, мікропроцесорних контролерів і ЕОМ.

4.8. Термоперетворювачі з уніфікованими вихідними сигналами

Для того щоб отримати інформацію про вимірювану температуру у вигляді уніфікованого сигналу (наприклад, щоб подати її на вхід регулятора, мікроконтролера чи ЕОМ), термоперетворювачі додатково укомплектовують відповідними нормувальними перетворювачами, конструктивно об'єднаними із самими термоперетворювачами – до позначення типу таких термоперетворювачів заводи-виробники додають літеру «У».

Термоперетворювачі опору типів ТСПУ і ТСМУ з НСХ відповідно 50П та 50М (НВО «Електротермія», приладобудівний завод, м. Луцьк) призначені для вимірювання температури в рідких, газоподібних та сипких речовинах і застосовуються у різних галузях промисловості. Термоперетворювачі опору типів ТСПУ-0288, ТСМУ-0288, ТСПУ-0289, ТСМУ-0289 мають вихідний сигнал постійного струму 4...20 мА, а ТСГГУ-0388 і ТСМУ-0388 містять гальванічну розв'язку між джерелом живлення та виходом і мають десятирозрядний послідовний інтерфейсний вихід.

Термоперетворювачі опору з уніфікованими вихідними сигналами виготовляють як у звичайному, так і у вибухозахищеному виконанні.

Термоперетворювачі опору серії КВАНТ ДТ1 (НВФ «АГАТ-1» м. Харків) призначені для неперервного перетворення температури вимірюваного середовища в уніфікований сигнал постійного струму 0...5 і 0(4)...20 мА чи напруги 0...5 і 0...10 В. Їх можна застосовувати в системах автоматичного контролю і регулювання будь-яких галузей промисловості. Виробляють такі ТО у звичайному чи вибухозахищеному, пило- і водозахищеному та вібростійкому виконаннях. Діапазон вимірюваних температур – мінус 250...+450 °С. Напруга живлення ТО становить 24 і 36 В постійного струму. Електричне підключення можна виконувати за допомогою дво-, три- чи чотирипровідної лінії зв'язку. Матеріали захисної арматури – сталь 12Х18Н10Т, титановий сплав або інший залежно від робочого середовища. Корпус виготовляють з алюмінієвого сплаву чи іншого матеріалу із захисним емалевим покриттям.

Довжина заглибної частини ТО може становити: 80; 100; 120; 160; 200; 250; 320; 400; 500 мм і більше (обумовлюється під час оформлення замовлення). У разі потреби термоперетворювачі виготовляють з цифровою індикацією (позначення – ДТЦ1) безпосередньо в корпусі ТО чи з виносним блоком цифрової індикації.

Межа основної припустимої похибки датчиків температури може становити 0,25; 0,4; 0,5; 0,6 або 1 %. Середнє напрацювання термоперетворювача на відмову – до 150 000 год. Кліматичне виконання дозволяє застосовувати ТО за таких умов зміни температури навколишнього повітря: мінус 20.. .+60, мінус 40.. .+80 °С та 1... 125 °С.

Термоелектричні перетворювачі типу ТХАУ призначені для вимірювання температури рідких, газоподібних та сипких речовин і застосову-

ються у різних галузях промисловості. При цьому ТП типів ТХАУ-0288 і ТХАУ-0388 (НВО «Електротермія», приладобудівний завод, м. Луцьк) мають звичайне виконання, а ТХАУ-0289 – вибухозахищене, що дозволяє використовувати їх у нафтодобувній, нафтопереробній, нафтохімічній промисловості та у виробництві мінеральних добрив (розраховані для роботи у вибухонебезпечних зонах усіх класів).

Термоперетворювачі типів ТХАУ-0288 і ТХАУ-0289 мають вихідний сигнал постійного струму 4...20 мА, а ТХАУ-0388 – гальванічну розв'язку між джерелом живлення та виходом і десятирозрядний послідовний інтерфейсний вихід.

Термоперетворювачі типів ТСПУ-0289, ТСМУ-0289 і ТХАУ-0289 поставляються з комплектом монтажних частин під трубний і кабельний монтажі. Діаметр захисної гільзи всіх ТО і ТП може становити 8 і 10 мм.

4.9. Особливості вимірювання температури контактними методами

У разі безконтактного вимірювання ЧЕ перетворювача перебуває поза досліджуваним об'єктом, що виключає спотворення температурного поля об'єкта і дає змогу вимірювати температуру об'єктів малої теплоємності. Однак їх дуже рідко застосовують для хіміко-технологічних вимірювань, позаяк основне застосування безконтактних методів – це вимірювання високих температур.

Особливістю контактних методів є використання первинних перетворювачів, які в процесі вимірювання перебувають у безпосередньому тепловому контакті (тепло від досліджуваного об'єкта до ЧЕ перетворювача передається теплопровідністю та конвекцією) з вимірюваним середовищем.

Вимірювання температури в потоках газів і рідин. Оскільки первинний перетворювач розміщується безпосередньо в досліджуваному середовищі, для якого він стороннє тіло, завжди спостерігається деяке спотворення температурного поля середовища як наслідок неоднорідності теплофізичних властивостей середовища і перетворювача, а також неточність (особливо для газових потоків великої швидкості) перетворення температури середовища в температуру перетворювача (слід зазначити, що, який би принцип дії не реалізовували засоби вимірювання температури, вони показують лише власну температуру термоприймача, точніше – температуру його робочої частини, тобто ЧЕ).

Ступінь спотворення температурного поля залежить здебільшого від теплоємностей досліджуваного середовища та перетворювача і є незначним. Що ж стосується неточності (похибки) відтворення термоперетворювачем температури досліджуваного середовища, то вона зумовлена тепловідведенням через елементи конструкції термоперетворювача, теплообміном шляхом випромінювання (для газових середовищ), тепловою інерцією, а також такими внутрішніми джерелами енергії, як нагрівання ЧЕ термоперетворювача вимірювальним струмом, і може набувати досить великих значень. Зменшенню цієї похибки сприяють оптимальний вибір конструкції перетворювача та правильне встановлення його на до-

сліджуваному об’єкті. Зокрема, для зменшення похибок від тепловідведення конструкційні елементи перетворювача виготовляють з матеріалів малої теплопровідності, а відношення довжини перетворювача до його діаметра вибирають порівняно великим. Для зменшення теплообміну через випромінювання між термоприймачем і тілами довкола нього, зокрема стінками труб, можна використовувати термоприймачі з гладкою - ще краще з блискучою – поверхнею (коефіцієнт випромінення гладких поверхонь менший, аніж шорстких) або охоплювати термоприймачі відбивними екранами. І за будь-яких обставин слід забезпечити надійний тепловий контакт між ЧЕ перетворювача та досліджуваним середовищем.

Для правильного вибору перетворювача температури, його типу, розмірів, конструкції та способу встановлення на об’єкті вимірювання слід також враховувати особливості його взаємодії з вимірюваним середовищем, оскільки під час вимірювання температури в рідинах і газах виникають свої труднощі (так само і на твердих поверхнях, особливо, якщо вони рухомі). Теплообмін між зондом і таким середовищем дуже залежить від параметрів, які характеризують властивості середовища (в’язкості, теплопровідності й швидкості), і одночасно від інерційності зонда, різниці між його температурою і температурою середовища в умовах рівноваги та (наприклад, у випадку ТО) від його саморозігрівання в процесі вимірювання.

Трубопровід, яким тече потік, зазвичай має температуру, відмінну від температури навколишнього середовища. У зв’язку з радіальними градієнтами температури, що при цьому виникають, постає завдання щодо найкращого розташування зонда в потоці; крім того, у ряді випадків радіаційний теплообмін між зондом і стінками каналу може призводити до істотної зміни рівноважної температури зонда. Нарешті, за великих швидкостей протікання рідин зонд може нагріватися внаслідок тертя, а в газах – унаслідок стискання газу перед перешкодою, якою є зонд.

Ступінь нагрівання залежить також від форми та розміщення корпуса зонда (максимальне нагрівання спостерігається у разі розміщення корпуса впоперек потоку рідини). Величина нагріву пропорційна Pr^nV^2 (тут Pr – число Прандтля, що залежить від в’язкості рідини, а показник *n* визначається характером течії; V – швидкість потоку). Наприклад, за швидкості 30 м/с зонд, установлений поперек потоку, в рідині з малою в’язкістю (вода, Pr = 7,5) нагрівається на 0,2 °С, а в рідині з високою в’язкістю (масло, $Pr = 10^4$) – на 20 °С. Зазвичай, якщо в’язкість рідини не дуже велика, для швидкостей $V < 3$ м/с цим нагріванням можна знехтувати.

Вимірювання температури твердих тіл і поверхонь. Головна проблема вимірювання температури твердих тіл – забезпечення надійного теплового контакту між технічним засобом і об’єктом вимірювання. Так, труднощі виникають у разі вимірювання температури твердих тіл невеликих об’ємів, особливо зі значними температурними перепадами (зазвичай у таких випадках використовують мікромініатюрні термопари).

Найскладніше вимірювати температуру рухомих поверхонь (вальців, каландрів, сушильних барабанів тощо). За таких умов у разі вимірювань

контактним способом виникають додаткові похибки, зумовлені тертям термоприймача об контрольовану поверхню, особливо за великих швидкостей руху. Ці похибки залежать від правильності контакту термоприймача, чистоти контрольованої поверхні й інших чинників. До того ж, термопара в таких умовах швидко зношується. Для таких вимірювань використовують поверхневі термопари з ЧЕ (самі термоелектроди чи захисні чохли) спеціальної форми, наприклад, лучкові, плівкові та фольгові ТП і ТО, з пластинчастими наконечниками, проміжним пристроєм або шаром тощо.

Ковзні контакти у випадку обертових деталей створюють небезпеку введення у вимірювальне коло змінних (перехідних) опорів контакту, паразитних ЕРС термоелектричної природи та шуму. Тому застосовують неконтактні методи з використанням звичайних контактних засобів вимірювання температури. Один з таких методів – пасивний індуктивний зв'язок (рис. 4.33).

Розміщене на обертовій деталі вимірювальне коло складається з котушки індуктивності, з'єднаної послідовно з ТО, наприклад, термістором. Ця котушка періодично проходить між двома нерухомими котушками – передавальною, заживленою від генератора, і приймальною, з'єднаною з вимірювальною установкою. Чим вища температура, тим менший опір термістора й тим більше загасання сигналу, сприйманого приймальною котушкою. Перевага цього способу полягає в простоті рухомих елементів, яка забезпечує надійність і стабільність роботи.

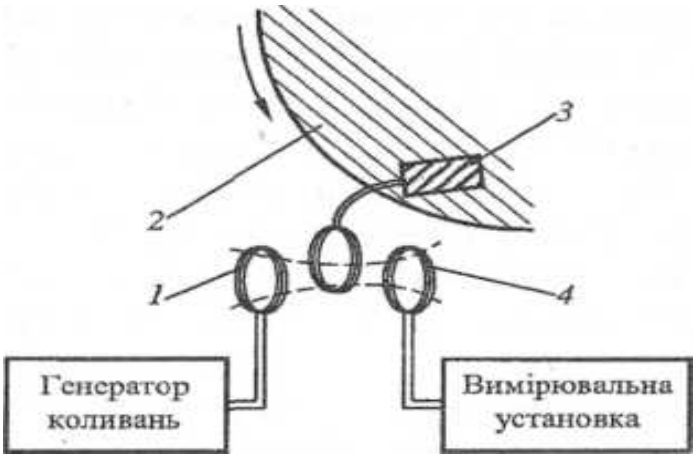


Рис. 4.33. Вимірювання температури в рухомому об'єкті методом пасивного індуктивного зв'язку:

1 – котушка збудження; 2 - обертове тіло; 3–термістор; 4 – приймальна котушка

Пристрій для вимірювання та візуальної реєстрації температури вкладиша шатунного підшипника, який реалізує метод пасивного індуктивного зв'язку, має такі метрологічні характеристики: діапазон вимірювання температури 75... 125 °С; кутову швидкість обертання 60... 1200 об/хв; напрям

обертання - будь-який; вплив зміни кутової швидкості – незначний; похибку ±2 °С; час становлення показань - 20...30 с.

4.10. Кварцові термометри

Класичним застосуванням кварцу є створення генераторів частоти з дуже високою стабільністю, зокрема температурною. Для цього вибирають пластинку кварцу з такою кристалографічною орієнтацією, за якої вплив зміни температури на частоту кварцового генератора мінімальний. У разі використання кварцу як датчика температури, навпаки, пластинку вибирають із такою кристалографічною орієнтацією, для якої частота генератора є квазілінійною функцією температури кварцової пластинки. Виготовлений у такий спосіб ПВП має високі точність і чутливість. Додаткові переваги кварцового термометра − незалежність точності вимірювання від шуму, спричиненого передаванням інформації, та простота перетворення частотної інформації в цифрову.

Зі зміненням температури змінюються розміри пластинки, її питома вага та модулі пружності, що супроводжується змінюванням частот механічного резонансу $f_0 = (n/l)\sqrt{c/\rho}$ (тут c - модуль пружності, що залежить від кристалографічної орієнтації; ρ - питома вага кварцу, l – розмір пластинки в напрямі поширення коливань; n — ціле число, зазвичай від 1 до 5) та значень параметрів *L, C, R* (рис. 4.34, *а),* які є електричними характеристиками пластинки (їх значення залежать від геометричних, механічних і кристалографічних характеристик пластинки); C_0 – ємність металевих електродів. У загальному випадку маємо

$$f(t) = f_0(1 + at + bt^2dr^3),$$

де температура *t*, виражена в градусах Цельсія; значення коефіцієнтів *a, b, d* залежать від напряму зрізу кварцової пластинки.

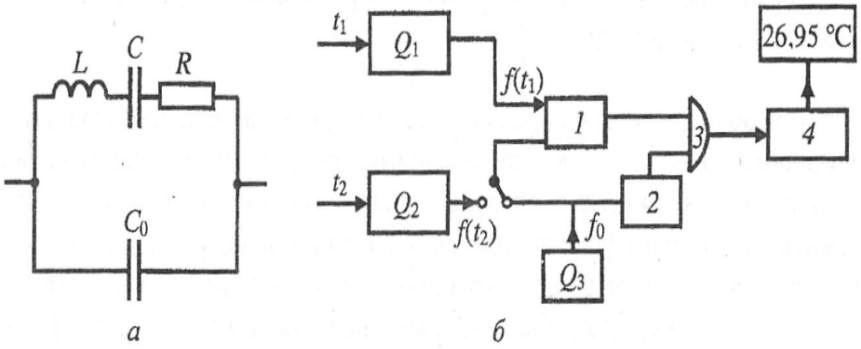


Рис. 4.34. Еквівалентна електрична схема пластинки кварцу (*а*) та блок-схема кварцового термометра (*б*):

1 - змішувач; 2 - генератор часових імпульсів; 3 - схема збігу; 4 - лічильник

Використовуючи спеціальні напрями зрізу кристалів кварцу, можна одержати напрям осі кристала, для якого найбільший коефіцієнт *а* дорівнює

нулю. Завдяки цьому частота коливань такого кристала майже не залежить від температури.

Можна знайти також зріз кристала з фактично нульовими значеннями коефіцієнтів b та d, тобто такий, для якого практично зникають і коефіцієнти вищих порядків. Тоді резонансна частота майже лінійно залежатиме від температури, завдяки чому кварц стає чудовим датчиком для цифрових вимірювань температури. Тому чутливість резонансної частоти до температури для такого зрізу є сталою величиною:

$$S = \Delta f / \Delta t = a f_0.$$

Конструктивно кварцовий ПВП температури являє собою пластинку кварцу, розміщену в стальному корпусі, заповненому гелієм для збільшення теплопровідності між кварцом і корпусом. Кварцова пластинка, з'єднана провідниками з активним елементом, утворює в сукупності генератор, який формує вимірювальний сигнал:

$$e_m = E_m cos\Omega_m t,$$

де $\Omega_m = 2\pi f_m$ – колова частота; $f_m = f_0 + \Delta f$ і $\Delta f = S(t - t_0) = St$, якщо $t_0 = 0$ °С.

Кварцовий генератор опорної частоти генерує сигнал er з частотою f0, яка майже не залежить від температури навколишнього середовища:

$$e_r = E_r \cos\Omega_0 t, (\Omega_0 = 2\pi f_0).$$

Сигнали e_m та e_r надходять на вхід перетворювача частоти, наприклад, помножувача, із виходу якого знімається напруга:

$$u'_0 = k e_m e_r - E'_0[\cos(\Omega_m - \Omega_r)\, t + \cos(\Omega_m + \Omega_r)\, t].$$

За допомогою низькочастотного фільтра відсікаються верхні частоти, що враховуються членом cos $(\Omega_m + \Omega_r)\, t$, і тоді

$$u_0 = E_0 \cos(\Omega_m - \Omega_r)\, t = E_0 cos 2\pi \Delta f t.$$

Визначивши за допомогою частотоміра величину Δf та знаючи S, можна знайти температуру

$$T = \Delta f / S.$$

Для абсолютного вимірювання температури частота кристала датчика порівнюється із частотою контрольного (порівняльного) кристала, виготовленого за іншою технологією, внаслідок чого його частота майже не залежить від температури; до того ж він працює в термостаті з постійною температурою. Частота биття (різниця частот) вимірюється електронним лічильником. Якщо потрібно визначати різницю температур, то зіставляють частоти двох однотипних ЧЕ (кристалів кварцу).

Блок-схему установки для вимірювання температури показано на рис. 4.34, *б*. Вона реалізує описаний принцип, який здебільшого відповідає інтегрувальному аналого-цифровому перетворенню з поданням напруги у вигляді частоти, з тією лише різницею, що тут датчик вимірюваних величин і генератор квантування сполучені.

Кварц Q_1 У поєднанні зі схемою генератора 2 являє собою ПВП вимірюваної температури t_1 Щоб заглушити частоту $f(t = 0)$, частота $f(f)$ у схемі змішування 1 накладається на сталу частоту f_0 і період биттів відлічується

через постійний проміжок часу. Наприкінці інтервалу лічення, який можна визначати за допомогою частоти f_0, на лічильнику буде отримано значення температури в цифровій формі. Наприклад, якщо інтервал лічення 10 мс, цифровий індикатор показує температуру в сотих частках градуса. Якщо замість незалежного від температури генератора Q_3 вмикають другий датчик температури Q_2, що має такі ж властивості, як і Q_1, то результат вимірювання покаже різницю температур t_1- t_2.

Кварцові термометри вирізняються дуже високою точністю. Промислові кварцові термометри мають такі метрологічні характеристики: діапазон вимірювання -80...+250 °С; нелінійність +0,05 % у вказаному діапазоні (це на порядок менше, ніж має платиновий ТО у такому ж інтервалі температур); чутливість 1000 Гц/°С; похибка, зумовлена гістерезисом, +0,05 °С; температурна стала часу T = 2,5 с у потоці води зі швидкістю до 22 м/с. Роздільна здатність залежить від прийнятого періоду лічення. Динаміка вимірювальної системи визначається розмірами ЧЕ термометра.

Незважаючи на їх високу точність (абсолютна похибка становить 0,002 К), кварцові термометри надзвичайно прості за конструкцією і мають універсальну застосовність. Безпосереднє цифрове показання дозволяє швидко видавати результати вимірювання. В аналогових приладах такого ж класу точності знадобилося б набагато більше затрат на компенсацію та розшифрування даних аж до одержання результату вимірювання. До того ж кварцові термометри видають сигнали, зручні для реєструвальних пристроїв або подальшої цифрової обробки.

4.11. Вимірювання температури за допомогою напівпровідникових терморезисторів, діодів і транзисторів

В якості датчиків температури широке застосування знаходять напівпровідникові терморезистори, діоди і транзистори.

Напівпровідниковим терморезистором називається прилад, принцип дії якого базується на зміні опору напівпровідникового матеріалу при зміні температури. На їх основі створюють пристрої, які мають підвищену точність і швидкодію.

Основною характеристикою терморезистора є температурна характеристика, яка достатньо точно описується рівнянням

$$R = R(T_1)\exp(B/T - B/T_0), \qquad (4.49)$$

де $R(T_1)$–номінальне значення опору при температурі T_1 (звичайно T_1=293К); $T-$ температура; $B-$ коефіцієнт, сталий для даного екземпляру терморезистора.

При протіканні електричного струму в терморезисторі виділяється теплота , що призводить до зміни його опору (рис.4.35,*а*). Як видно з рис.4.35, *а* із зростанням температури опір терморезистора зменшується.

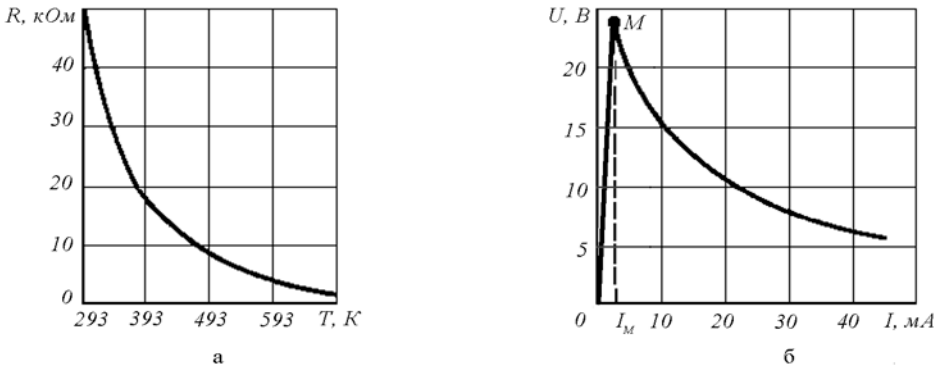


Рис. 4.35. Характеристики терморезистора:

а – температурна, *б* – ВАХ

Температурну чутливість терморезисторів прийнято характеризувати величиною їх температурного коефіцієнта опору

$$TKO = \frac{\Delta R_{\text{Т}}}{R_1 \Delta T} 100, \qquad (4.50)$$

де $R_{\text{Т}}$ – опір терморезистора при нормальній температурі; ΔT – гранична різниця між максимальною позитивною і нормальною температурами; $\Delta R_{\text{Т}}$ – алгебраїчна різниця між значеннями опорів, виміряних при максимальній і нормальній температурах.

Типове значення TKO = -2…-8.5 %/$^{\text{o}}$C

На даний період вже розроблені терморезистори з позитивним значенням TKO.

Промисловість випускає терморезистори типів СТ1-21, СТ3-21, СТ1-27, СТ3-27, СТ3-31 та інш.

При вимірюванні температури за допомогою напівпровідникових діодів використовують температурні залежності або зворотного струму *p-n*–переходу $(I_{\text{зв}})$, або прямого спаду напруги на *p-n*–переході $(U_{\text{пр}})$. Нагадаємо, що зворотний струм реального діода має три складові: струм витоку $I_{\text{вит}}$, струм генерації $I_{\text{ген}}$, обумовлений регенерацією та рекомбінацією носіїв в області *p-n*–переходу, та тепловий струм I_0.

Струм витоку визначається поверхневими енергетичними станами і слабо залежить від температури. Його рівень, в основному, визначає зворотну напругу *p-n*–переходу. Струм генерації залежить як від зворотної напруги *p-n*–переходу, так і від його температури. Тепловий струм практично не залежить від зворотної напруги і майже повністю визначається температурою *p-n*–переходу. Цей струм практично для всіх діодів визначається за формулою

$$I_0 = qVn_i^2 / (\tau N_{\text{Б}}), \qquad (4.51)$$

де q–заряд електрона; V – об’єм напівпровідникового кристалу, де генеровані носії беруть участь в утворенні теплового струму; n_i – власна концентрація носіїв заряду в матеріалі напівпровідника; τ – час життя

основних носіїв заряду; $N_Б$ – концентрація основних носіїв заряду в області бази.

При великих напругах з достатньою точністю можна вважати, що

$$I_{зв} \approx I_0 \approx N \exp\left(-\frac{qE_q U_T}{kT}\right), \qquad (4.52)$$

де N – стала, що не залежить від температури; E_q – ширина забороненої зони напівпровідника; U_T – константа, яка дорівнює 0.5…1; k –стала Больцмана.

Типова залежність $I_{зв} = f(T,°C)$ для різних діодів наведена на рис. 4.36 (1–германієвий сплавно-дифузійний перехід; 2 – германієвий сплавний перехід; 3 – кремнієвий дифузійний перехід).

Прямий спад напруги на *p-n*–переході може бути визначений з виразу для ВАХ ідеального *p-n*–переходу

$$U_{пр} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{пр}}{I_{зв}} + 1\right), \qquad (4.53)$$

де $I_{пр}$ –прямий струм *p-n*–переходу. *ТКН* діода

$$ТКН = \frac{\partial U_{пр}}{\partial T} = -2\frac{мВ}{°C} + K \ln I_{пр}, \qquad (4.54)$$

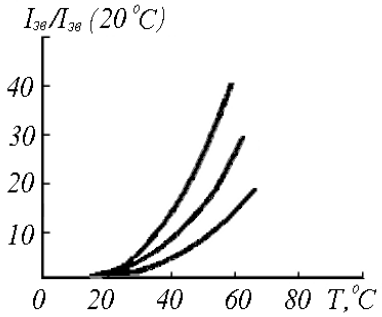


Рис. 4.36 Залежність зворотного струму реального діода від температури

де K –стала, яка визначається типом складової струму діода (дифузійна– 0.198; рекомбінаційна: низький рівень інжекції – 0.375, високий рівень інжекції – 0.596).

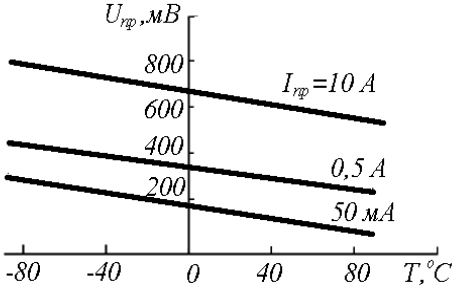


Рис. 4.37. Залежність прямого спаду напруги на *p-n*–переході від температури та прямого струму для германієвого сплавного діода

Реальна величина *ТКН* прямого спаду напруги на діоді лежить у діапазоні від –1 до –3.5 *мВ/°С*. На рис.4.37 наведені типові залежності $U_{\text{пр}} = f\left(T, {}^0C, I_{\text{пр}}\right)$ для германієвого сплавного діода. На практиці найчастіше для вимірювання температури використовують залежності $U_{\text{пр}} = f\left(T, {}^0C\right)$, що пояснюється наступними причинами. По-перше, при виконанні умови $I_{\text{пр}} = const$ залежність $U_{\text{пр}} = f\left(T, {}^0C\right)$ носить лінійний характер. По-друге, напруга $U_{\text{пр}}$ легко піддається безпосередньому вимірюванню.

Нехтуючи спадом напруги на омічному опорі діода, можна вважати, що $U_{\text{Д}} \approx U_{\text{пр}}$. Тоді для діода, як датчика температури, можна записати

$$U_{\text{Д}}\left(T, {}^0C\right) = U_{\text{Д0}} + TKH\ \left(T_{\text{Д}} - T_0\right),$$

де $U_{\text{Д0}}$ –спад напруги на діоді при температурі T_0; $T_{\text{Д}}$ –вимірювана температура.

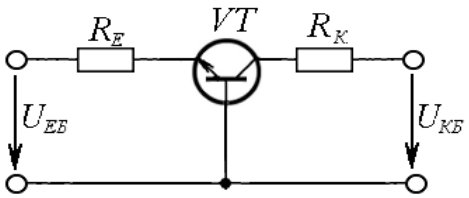


Рис. 4.38 Схема термоперетворювача на біполярному транзисторі

Використання біполярних транзисторів дозволяє значно поліпшити характеристики термоперетворювачів. Досліди показали, що найкращих результатів можна досягти при використанні режиму роботи транзистора, при якому емітерний і колекторний переходи транзистора, ввімкненого за схемою з *СБ*, зміщені у прямому напрямі (рис.4.38). Для схеми з *СБ n-p-n*– транзистора (рис.4.38) при заданому струмі емітера температурний коефіцієнт колекторного струму практично незмінний до температури 80…100 ^oC для германієвих та 120…150 ^oC для кремнієвих транзисторів. Реальна похибка зміни струму не перевищує 2…3%. При цьому значення температурного коефіцієнта струму колектора практично не залежить від самого струму колектора і може плавно регулюватися зміною значень I_0 та $R_{\text{к}}$. На рис. 4.39 зображені експериментальні залежності $I_K = f\left(T,°C\right)$, одержані для транзисторів різного типу при різних значеннях $R_{\text{к}}$ (1 – транзистор КТ114А; 2 – транзистор ГТ109Б).

На практиці широке розповсюдження одержав датчик температури на двох транзисторах, технологічно виконаних на одному кристалі (рис. 4.40). Цей датчик, хоча й має меншу чутливість, ніж датчик на одному транзисторі, але вигідно відрізняється від нього меншою нелінійністю перетворення.

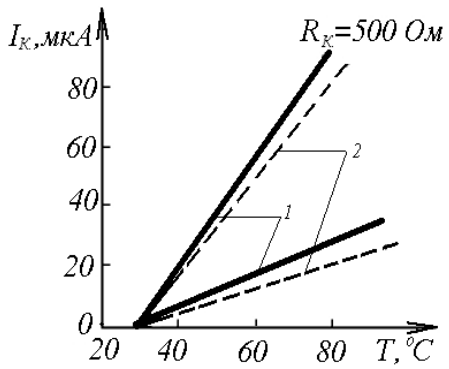


Рис. 4.39 Експериментальні залежності струму колектора від температури для транзисторів різного типу при різних значеннях $R_к$ (1 – транзистор КТ114А; 2 – транзистор ГТ109Б)

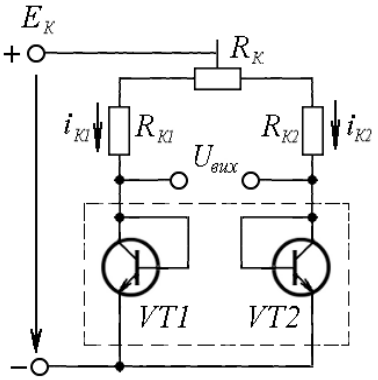


Рис. 4.40.Схема датчика температури на двох транзисторах, технологічно виконаних на одному кристалі

Залежність зміни вихідної напруги від границь зміни температури для схеми на рис.4.40 визначається за формулою

$$\Delta U_{\text{вих}}\left(T,^0C\right)=\Delta T\frac{2k}{q}\ln\frac{I_{\text{К2}}}{I_{\text{К1}}}, \qquad (4.55)$$

де k – стала Больцмана; q – заряд електрона.

З виразу (4.55) можна зробити висновок: вихідна напруга датчика прямо пропорційна зміні температури і не залежить ні від властивостей напівпровідникового матеріалу, ні від технології виготовлення транзистора ($k/q = const \approx 0{,}079\ мВ/^0C$. Такий датчик дає хороші результати при вимірюванні температури середовища у діапазоні (від –25 до +100 ^0C).

Для одержання високого коефіцієнта перетворення у вузькому діапазоні зміни температури може бути застосований датчик, схема якого наведена на рис. 4.41. В даній схемі транзистор *VT1* виконує роль чутливого елемента. Для цього його емітерний перехід зміщений у зворотному напрямку. Транзистор *VT2* ввімкнений по схемі з *CE* і виконує роль підсилювача. При зміні температури змінюється спад напруги на зворотно зміщеному емітерному переході *VT1*, а отже, змінюється базовий струм транзистора *VT2*, що призводить до зміни спаду напруги на резисторі $R2$.

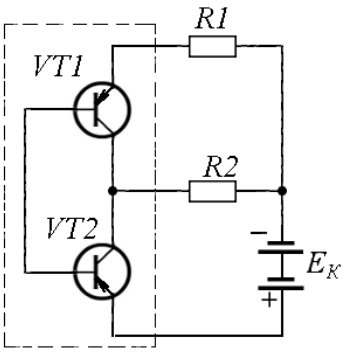


Рис.4.41. Схема датчика температури на двох транзисторах

4.12. Пірометри випромінювання

Принцип дії пірометрів випромінювання ґрунтується на використанні теплового випромінення нагрітих тіл. Вимірювання температури за випромінюванням тіла грунтується на використанні основних законів випромінювання, які встановлюють зв'язок між температурою випромінювача (досліджуваного об'єкта) та його спектральною світністю, тобто кількістю енергії, яка випромінюється за одиницю часу з одиниці поверхні досліджуваного об'єкта і яка міститься у певному діапазоні довжин хвиль.

Променева енергія виділяється нагрітим тілом у вигляді хвиль різної довжини. За порівняно низьких температур (до 500 °С) нагріте тіло випромінює інфрачервоні промені, що не сприймаються людським оком. З підвищенням температури колір тіла змінюється від темночервоного до білого, який містить хвилі всіх сприйманих оком довжин. Одночасно з підвищенням температури нагрітого тіла та зміненням його кольору швидко зростають спектральна енергетична світність (СЕС) E і спектральна енергетична яскравість (СЕЯ) B. Перша являє собою потік випущеного випромінювання Ф з одиниці поверхні за температури T в одиничному інтервалі довжин хвиль $d\lambda$ (від λ до $\lambda+\Delta\lambda$), а друга - спектральну енергетичну світність, віднесену до одиниці тілесного кута $d\omega$. Між ними існує прямо пропорційна залежність:

$$B_\lambda = k_\lambda E_\lambda \,, \qquad (4.56)$$

де $k_\lambda = 1 / \pi -$ сталий коефіцієнт.

Названі властивості нагрітих тіл використовують для вимірювання їх температури, і відповідно до цих властивостей, тобто залежно від спектральної чутливості, пристрої вимірювання температури за випромінюванням поділяють на радіаційні, квазімонохроматичні та спектрального випромінювання. Найбільш широко пірометричні прилади застосовують в металургії та хімічній промисловості для вимірювання температури в різних печах, реакторах, котельних установках та ін.

Пірометри випромінювання порівняно з іншими пристроями температури мають певні переваги: безконтактний метод вимірювання, завдяки якому не відбувається спотворення температурного поля, спричинюване

наявністю у вимірюваному середовищі термодатчика (зонда); верхня границя вимірювання теоретично майже необмежена; можливість вимірювання високих температур газових потоків і полум'я за високих швидкостей, коли застосування інших приладів пов'язано з великими труднощами. Завдяки надзвичайно малій інерційності їх можна успішно застосовувати для відслідковування дуже швидких процесів охолодження чи нагрівання, коли застосування контактних вимірювачів неможливе через притаманну їм інерційність.

Радіаційні пірометри (пірометри повного випромінювання). Теоретична основа радіаційної пірометрії – закон Стефана-Больцмана для повної (інтегральної) енергетичної світності, за яким визначається повна теплова енергія, що випромінюється абсолютно чорним тілом (так називають тіло, яке має коефіцієнт поглинання $\alpha = 1$, тобто поглинає, не відбиваючи й не пропускаючи крізь себе, весь променевий потік Ф) із температурою T за одиницю часу одиницею його поверхні:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

де C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; T – абсолютна температура тіла.

Пристрої, які грунтуються на цьому принципі, називають *пірометрами повного випромінювання* або *радіаційними пірометрами.* Вони найпростіші за будовою, але водночас і найменш точні серед приладів, якими вимірюють температуру за випроміненням. Радіаційними пірометрами вимірюють температуру за потужністю випромінювання нагрітого тіла.

Радіаційний пірометр складається з оптичної системи (телескопа), первинного вимірювального перетворювача (термоприймача) потоку випромінювання в електричний сигнал і вторинного вимірювального приладу. Оптична система збирає промені, які виділяє нагріте тіло, і спрямовує їх на термоприймач – мініатюрну термоелектричну батарею з декількох малоінерційних, послідовно з'єднаних термопар, які чутливі до всіх довжин хвиль випромінюваного потоку, що ними сприймається.

Існують два різновиди оптичних систем радіаційних пірометрів: рефракторна (із заломлювальною лінзою) і рефлекторна (з відбивальним внутрішнім дзеркалом – рефлектором).

Принципову схему рефракторного (більш поширеного, ніж рефлекторний) радіаційного пірометра з термобатареєю, яку для захисту від теплових утрат і механічних пошкоджень розміщено в скляному балоні, заповненому повітрям, показано на рис. 4.42*, а.*

Пірометр має телескоп із лінзою 1 об'єктива та лінзою 5 окуляра. На шляху променевого потоку від лінзи об'єктива (від контрольованого тіла) встановлено обмежувальну діафрагму 2, а в фокусі лінзи – термобатарею 3. Робочі кінці термопар прикріплено до металевих пластинок, зачорнених для кращого поглинання теплових променів, а вільні кінці за допомогою подовжувальних проводів виводяться через цоколь скляного балона та

підключаються до вимірювального приладу 6. У результаті нагрівання робочих кінців термопар променевим потоком, що надходить крізь лінзи об'єктива, утворюється термо-ЕРС, величина якої вимірюється приладом 6 (зазвичай мілівольтметром або автоматичним потенціометром). Перед окуляром 5 розміщено червоний світлофільтр 4 для захисту очей пірометриста під час встановлення та настроювання пірометра.

Компенсація відхилення температури вільних кінців термопар від температури градуювання (вони перебувають у тепловому контакті з корпусом телескопа, градуювання та вивірювання якого виконують за температури 20± 2 °С) забезпечується термочутливим резистором.

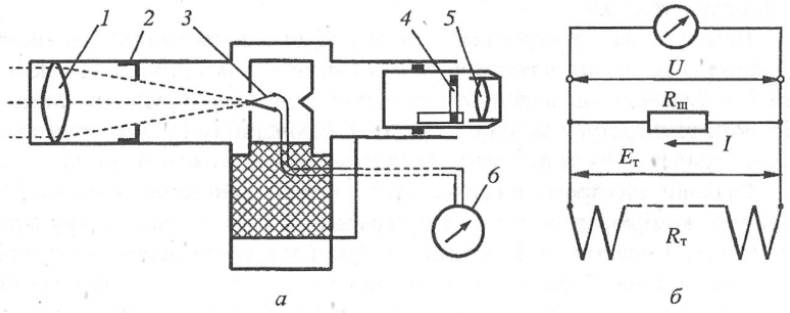


Рис. 4.42. Принципова схема (а) та схема термокомпенсації (б) пірометра повного випромінювання:

1 – лінза об'єктива; 2 – діафрагма; 3 – термоелектрична батарея; 4 – світлофільтр; 5 – лінза окуляра; 6 – вимірювальний прилад

Схему, що ілюструє найпоширеніший спосіб температурної компенсації показань пірометра за допомогою електричного шунта $R_ш$, виготовленого з міді або нікелю, показано на рис. 4.42, *б*. Резистор $R_ш$, який шунтує термобатарею з опором $R_т$, розміщують у корпусі поряд із вільними кінцями ТП термобатареї. Залежно від значень термо-ЕРС $E_т$ термобатареї струм I, що проходить її колом, утворює на резисторі $R_ш$ спад напруги

$$U = IR_ш = \frac{E_т}{\frac{R_т}{R_ш}+1}, \qquad (4.57)$$

який вимірюють за допомогою вимірювального приладу 6. З підвищенням температури корпуса перетворювача і відповідного зростання опору резистора $R_ш$, як видно з виразу (4.57), відповідно підвищується спад напруги U, завдяки чому з'являється можливість (за умови правильного підбору початкового номіналу $R_ш$) значно скомпенсувати зменшення термо-ЕРС $E_т$ термобатареї і цим знизити додаткові похибки вимірювання від нагрівання телескопа в робочому інтервалі 0... 100 °С.

Радіаційні пірометри зазвичай градуюють за чорним випромінювачем. Тому в разі вимірювання температури реальних нечорних тіл (через їх меншу випромінювальну здатність) радіаційні пірометри показують не дійсну температуру T досліджуваного об'єкта, а нижчу, так звану радіаційну температуру $T_р$, пов'язану з дійсною температурою досліджуваного об'єкта залежністю

$$T_р = T\sqrt[4]{\varepsilon_T}\,, \text{ а } T = T_р\sqrt[4]{1/\varepsilon_T}\,,$$

де ε_T – коефіцієнт повного випромінювання, який дорівнює відношенню енергетичної світності досліджуваного об'єкта E до енергетичної світності чорного тіла E_0 за тієї ж температури T.

Радіаційною температурою $T_\text{р}$ *реального тіла,* що має температуру T, називають таку температуру чорного тіла, за якої його інтегральна світність дорівнює інтегральній світності реального тіла.

Для всіх реальних фізичних тіл $0 < \varepsilon < 1$, тому температура тіла, виміряна радіаційним пірометром $T_\text{р}$, завжди менша за його дійсну температуру T. Поправку, яку необхідно додати до виміряної пірометром повного випромінювання радіаційної температури для отримання дійсної температури досліджуваного об'єкта, визначають як

$$\Delta T = T - T_\text{р} = T - \left(1 - \sqrt[4]{\varepsilon_T}\right) = T_\text{р}\left(\sqrt[4]{1/\varepsilon_T} - 1\right),$$

а відносна похибка, викликана неврахуванням коефіцієнта сумарного випромінювання досліджуваного об'єкта,

$$\delta T_{\varepsilon_T} = (\Delta T/T) \cdot 100 = \left(\sqrt[4]{1/\varepsilon_T} - 1\right) \cdot 100\,,$$

що для $\varepsilon_T = 0{,}9$ становить близько 3 %, для $\varepsilon_T = 0{,}8$ – близько 6 %, а для $\varepsilon_T = 0{,}3$ досягає 35 %.

Для реальних фізичних об'єктів ε_T визначається властивостями об'єкта, станом його поверхні й іншими чинниками і може перебувати в межах від 0,9...0,95 до 0,1 або навіть нижче. Тому радіаційні вимірювання температури супроводжуються здебільшого попередньою оцінкою ε_T для внесення надалі поправок, зокрема регулюванням чутливості. Цього можна досягнути попереднім градуюванням радіаційного пірометра, суть якого полягає в одночасному вимірюванні температури цього об'єкта за допомогою радіаційного пірометра та іншого засобу, що вимірює не радіаційну, а дійсну температуру T, наприклад, за допомогою термоелектричного термометра або пірометра спектрального відношення. Порівнюючи ці показання, визначають ε_T і тоді для всіх наступних вимірювань температури такого об'єкта за допомогою радіаційного пірометра можна вводити поправку на коефіцієнт сумарного випромінення.

Незважаючи на відносно велику інерційність (одним зі способів збільшення швидкодії вимірювача є відмова від використання захисного балона), радіаційні пірометри досить широко використовують у виробничій практиці; їх можна встановлювати стаціонарно, вони дозволяють застосовувати дистанційне передавання вимірювальної інформації, автоматично записувати та регулювати температуру.

Колірні пірометри. Колірними пірометрами, використовуваними для промислових вимірювань, визначають відношення СЕЯ B у променях двох наперед вибраних довжин хвиль λ_1 і λ_2, тобто показання пірометра є функцією відношення $B_{\lambda 1}$ / $B_{\lambda 1}$; останнє можна замінити відношенням СЕС, оскільки згідно з рівнянням (4.51) $E_{\lambda 1}$ /$E_{\lambda 1}$=$B_{\lambda 1}$ / $B_{\lambda 1}$. Це відношення для кожної температури різне, але цілком однозначне.

Реальні фізичні тіла випромінюють менш інтенсивно, ніж абсолютно чорне тіло. Спектральна енергетична яскравість зростає (відповідно і СЕС) з підвищенням температури по-різному для хвиль різної довжини і в інтервалі відносно невисоких температур (приблизно до 3000 К) для абсолютно чорного тіла описується рівнянням Віна:

$$B_{0\lambda} = \mathrm{C}_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \qquad (4.58)$$

де $B_{0\lambda}$ – СЕЯ абсолютно чорного тіла для хвилі довжиною λ; T - абсолютна температура тіла; C_1 і C_2 – константи випромінювання, числові значення яких залежать від застосованої системи одиниць: $\mathrm{C}_1 = 2\pi hc^2$ ($h = 6{,}6261 \cdot 10^{-34}$ Вт · с^2 – стала Планка, $c \approx 2{,}998 \cdot 10^8$ м·с$^{-1}$ швидкість світла), $\mathrm{C}_2 = hc/k$ ($k = 1{,}380662 \cdot 10^{-23}$ Дж · К$^{-1}$ – стала Больцмана); в системі одиниць СІ $\mathrm{C}_1 = 3{,}7418 \cdot 10^{-16}$ Вт·м^2, $\mathrm{C}_2 = 1{,}4388 \cdot 10^{-2}$ м · К.

Для вищих температур СЕЯ абсолютно чорного тіла описується рівнянням Планка:

$$B_{0\lambda} = \mathrm{C}_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}.$$

Із залежності спектральної світності абсолютно чорного тіла від температури випромінювача випливає, що з підвищенням температури тіла максимум його спектральної світності зміщується в бік коротших хвиль (рис. 4.43, *а*). Це явище поступово змінює колір тіла та підсилює його яскравість у разі підвищення його температури.

Користуючись законом зміщення Віна, за положенням максимуму можна визначити абсолютну температуру тіла. Виміряна за цим методом температура отримала назву колірної $T_{\text{к}}$. *Колірною температурою реального тіла* $T_{\text{к}}$, яке має дійсну температуру *T,* називають таку температуру чорного тіла, за якої відношення його СЕЯ $B_{0\lambda_1.\,\mathrm{T_К}}/B_{0\lambda_2.\,\mathrm{T_К}}$ для довжин хвиль λ_1 і λ_2 дорівнює відношенню СЕЯ реального тіла $B_{\lambda_1}/B_{\lambda_2}$ для тих же довжин хвиль.

У загальному випадку $T_{\text{к}}$ відрізняється від дійсної температури *T.* Для обчислення дійсної температури реального тіла за виміряним значенням колірної температури використовують формулу

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{к}}} = \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})}{\mathrm{C}_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)} \qquad (4.59)$$

де ε_{λ_1} і ε_{λ_2} – коефіцієнти спектрального випромінювання для променів з довжиною хвилі відповідно λ_1 і λ_2.

Коефіцієнт спектрального випромінювання ε_λ визначають шляхом порівняння СЕС E_λ (або СЕЯ, враховуючи (4.56)) реального (сірого) тіла за певної довжини хвилі λ із СЕС $E_{0\lambda}$ абсолютно чорного тіла для тієї ж довжини хвилі:

$$\boldsymbol{\varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{0\lambda} = B_\lambda / B_{0\lambda}},$$

тобто він виражає ступінь чорноти реального тіла.

Для сірих тіл (у них значення коефіцієнта спектрального випромінювання на цій ділянці спектра не змінюється з довжиною хвилі: $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$), права частина рівняння (4.59) перетворюється в нуль, тому колірна температура $T_к$ таких тіл дорівнює їх дійсній температурі - це вважається основною перевагою колірних пірометрів.

Слід зазначити, що за температури понад 1000 °С випромінення значної кількості оксидів і карбідів металів, кераміки, вогнетривких матеріалів, графіту є майже сірим. Сірий спектр випромінювання зазвичай має також випромінювання оксидних плівок (ванадію, хрому, кремнію тощо) на поверхні сталевої ванни (розплаву). Це підтверджує перевагу колірного методу, позаяк яскравісна та радіаційна температури, на відміну від колірної, завжди менші за дійсну.

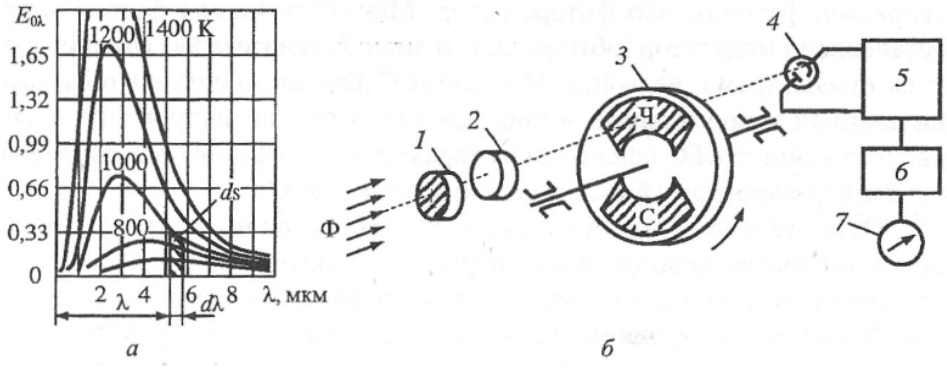


Рис. 4.43. Залежність СЕС абсолютно чорного тіла від температури (*а*) та схема пірометра спектрального відношення (*б*):

1 – захисне скло; 2 – об'єктив; 3 – обтюратор; 4 – приймач випромінювань; 5– електронний підсилювач; 6 – електронний логарифмувальний пристрій; 7 – вимірювальний прилад

Для тіл, ε_λ яких зменшується зі зростанням довжини хвилі (такими є більшість металів), колірна температура більша за дійсну, для тіл, ε_λ яких збільшується зі зростанням довжини хвилі, колірна температура менша за дійсну.

Більша частина колірних пірометрів ґрунтується на визначенні кольору вимірюваного тіла за відношенням СЕС (СЕЯ) для двох довжин хвиль, які не дуже наближені одна до одної у видимій частині спектра, наприклад, синього та червоного кольорів (тому колірні пірометри називають також *пірометрами спектрального відношення).*

Спрощену схему автоматичного колірного пірометра показано на рис. 4.43, *б.* Випромінювання Ф контрольованого тіла проходить крізь захисне скло 1 (для можливості візуального контролю), об'єктив 2 і потрапляє на приймач випромінювань 4, яким може бути піроелектричний перетворювач, фотодіод або фоторезистор. Між об'єктивом і фотоелементом установлено модулятор (обтюратор) сигналу 3, який має два отвори, закриті світлофільтрами: червоним *Ч* та синім *С*. Під час обертання обтюратора на приймач випромінювань 4 поперемінно потрапляє випромінювання червоної

та синьої СЕС (спектральна характеристика фотоелемента залежить від температури, тому його поміщено в термостат).

Отже, сигнал із приймача випромінювань – це послідовність чередования імпульсів, пропорційних енергетичній світності (яскравості) досліджуваного об'єкта в двох спектральних інтервалах, – червоному та синьому. Підсилені електронним підсилювачем 5 вони перетворюються спеціальним електронним логарифмувальним пристроєм 6 у сигнал постійного струму, який залежить від 1/T. Вихідним сигналом вимірювальної схеми є напруга постійного струму 0...1 В, яку можна вимірювати мілівольтметром, проградуйованим в одиницях вимірюваної температури 7 (є також вихід 0...100 мВ для підключення автоматичного потенціометра).

У разі вимірювання температури візуальними пірометрами СЕЯ B_λ є основною величиною, що сприймається оком людини. Як зазначалося, вона прямо пропорційна СЕС E_λ **.**

Квазімонохроматичні пірометри. Яскравість реального тіла, нагрітого до температури *T,* за довжини хвилі λ відповідно до рівнянь (4.56), (4.58) і (4.59) можна записати так:

$$B_{\lambda,T} = k_\lambda \varepsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \qquad (4.60)$$

А яскравість абсолютно чорного тіла, нагрітого до температури $T_я$,

$$B_{0\lambda,\text{тя}} = k_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_я}}, \qquad (4.61)$$

де $T_я$ – *яскравісна температура реального тіла,* під якою розуміють таку температуру абсолютно чорного тіла, за якої його СЕЯ $B_{\lambda,}$ $T_я$ дорівнює СЕЯ реального тіла B_λ для його дійсної температури, тобто $B_{0\lambda,}$ $T_я$=$B_{\lambda,}$ T .

Порівнявши праві частини рівнянь (4.60) і (4.61), після логарифмування отримаємо рівняння для обрахування дійсної температури фізичного тіла *T* за яскравісною (умовною) температурою $T_я$, виміряною квазімонохроматичним пірометром:

$$T = \left(\frac{1}{T_я} - \frac{\lambda}{C_2} ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}\right)^{-1} \qquad (4.62)$$

Для вимірювання яскравісної температури тіл (як видно з виразу (4.62), $T_я$ завжди менша за *T,* позаяк $\varepsilon_\lambda < 1$) використовують квазімонохроматичні пірометри – оптичні (візуальні) та фотоелектричні.

Принцип дії *оптичних пірометрів* ґрунтується на порівнянні спектральної яскравості тіла зі спектральною яскравістю градуйованого (еталонного) джерела випромінювання; таким джерелом зазвичай є нитка лампи розжарювання (пірометричної лампи) з регульованою яскравістю випромінювання. Чутливим елементом, яким визначають збіжність цих спектральних яскравостей у візуальних оптичних пірометрах, слугує людське око.

Найбільше поширений оптичний пірометр зі «зникною» ниткою, схему якого зображено на рис. 4.44. Для вимірювання температури об'єктив 1

приладу спрямовується на об’єкт вимірювання так, щоб спостерігач на його тлі побачив в окулярі 7 нитку пірометричної лампи 4.

Спектральні яскравості об’єкта вимірювання та нитки лампи 4 зазвичай порівнюють за довжини хвилі 0,65 мкм, для чого перед окуляром установлюють червоний світлофільтр 6. Це зумовлено тим, що через цей світлофільтр людське око сприймає лише вузьку частину спектра його пропускання, котра наближається до монохроматичного променя. Вхідна 3 та вихідна 5 діафрагми обмежують вхідний і вихідний кути пірометра, оптимальні значення яких дозволяють забезпечити незалежність показань приладу від змінювання відстані до об’єкта вимірювання.

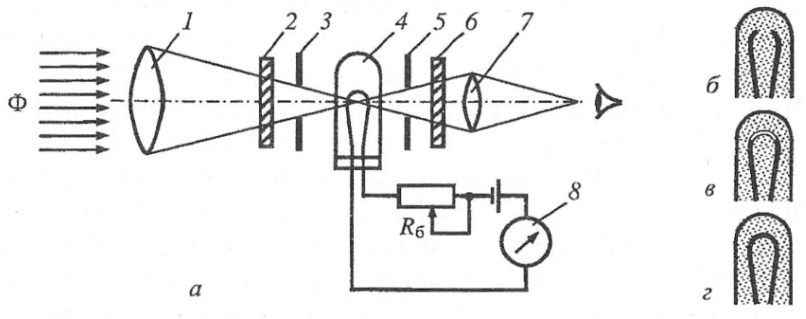


Рис. 4.44. Схема візуального оптичного пірометра (а) та варіанти зображення нитки пірометричної лампи залежно від співвідношення температур об’єкта вимірювання та нитки розжарення:

б – температура нитки занизька; *в* – температура правильна; *г* – температура зависока;1 – об’єктив; 2 – поглинальний світлофільтр; 3,5 – вхідна та вихідна діафрагми;4 – пірометрична лампа; б – червоний світлофільтр; 7 – окуляр; 8 – міліамперметр

Спостерігаючи за зображенням нитки лампи на тлі об’єкта вимірювання, за допомогою реостата R_6 змінюють силу струму, що від батареї надходить до нитки лампи, доти, доки яскравість нитки не стане такою ж, як видима яскравість об’єкта вимірювання. При цьому нитка «зникає» на тлі зображення об’єкта вимірювання (рис. 4.44, *в)*. У цю мить за шкалою міліамперметра 8, відградуйованою в значеннях яскравісної температури нитки лампи, визначають яскравішу температуру об’єкта, за якою згідно з рівнянням (4.50) розраховують дійсну температуру об’єкта вимірювання *Т*.

Для обмеження температури розжарювання нитки (для вольфраму – не більше 1500 °С) під час вимірювання вищих температур перед лампою встановлюють знімний поглинальний світлофільтр *2*, який видиму яскравість об’єкта вимірювання зменшує в кратну кількість разів. Тому в оптичних пірометрах зазвичай є дві шкали: за однією провадять відлік вимірюваної температури, коли пірометр працює без фільтра *2* (наприклад, від 800 до 1200 °С), а за другою – вимірюють більш високі температури (сучасні оптичні пірометри призначені вимірювати температуру в інтервалі 800…6000°С). Візуальним пірометрам, невід’ємним елементом вимірювального кола яких є

око людини, притаманна суб'єктивність отримуваного результату. Із цієї ж причини вони непридатні для роботи в системах автоматичного вимірювання і регулювання температури.

Тому наразі поширені квазімонохроматичні *фотоелектричні пірометри* (як і фотоелектричні пірометри часткового випромінювання). Фотострум, що створюється фотоелементом, може безпосередньо слугувати мірою вимірюваної температури. Такі пірометри конструктивно нескладні, але відрізняються низькою точністю. У досконаліших пристроях, фотоелемент використовують як пристрій порівняння спектральних світностей двох джерел випромінювання: досліджуваного об'єкта і регульованого джерела світла.

За принципом дії розрізняють два типи фотоелектричних пірометрів. До першого типу належать прилади, у яких сприймана променева енергія, потрапивши на ЧЕ, змінює його параметри (фотострум, фотоопір), котрі й виступають мірою вимірюваної температури. У приладах другого типу променеву енергію вимірюють компенсаційним методом (тут ЧЕ працює в режимі нуль-індикатора, що порівнює інтенсивність випромінювання від контрольованого тіла та стабільного джерела випромінювання – мініатюрної лампи розжарювання).

Фотоелектричні пірометри другого типу більш складні, але й більш точні, позаяк їх показання не залежать від ЧЕ та електронної схеми. Схему такого пірометра показано на рис. 4.45. За допомогою обертового дзеркала 3 у приймач випромінювання, що складається з фотоелемента 7 та електронного підсилювача 6, почергово подається вимірюване та контрольне випромінювання. За нерівності цих світлових потоків у колі фотоелемента з'явиться струм, змінна складова якого буде пропорційною різниці освітленості фотоелемента обома джерелами випромінювання. Із виходу електронного підсилювача *6* цей струмовий сигнал надійде на обмотку керування РД 5, який через зміщення повзунка реостата R_6 нагріватиме нитку контрольного джерела так, щоб змінна складова струму на виході приймача випромінювання була зведена до нуля.

Вітчизняна приладобудівна галузь виробляє значну кількість промислових пірометрів, різних за своїми параметрами та принципом дії.

Пірометри повного випромінювання агрегатного комплексу стаціонарних пірометричних перетворювачів типу АПІР-С призначені як для комплектування АСК технологічними процесами, так і для створення локальних приладів і систем вимірювання, контролю та регулювання температури. Ними вимірюють температуру в діапазоні 30...2500 °С з основною похибкою 1...2 %.

Пірометр ОПІР-017 – це оптичний (квазімонохроматичний) візуальний прилад зі «зникною» спіраллю змінного розжарювання; його виробляють у трьох модифікаціях, які відрізняються діапазоном вимірювання: 800...2000; 1200...3200; 1500...6000 °С відповідно.

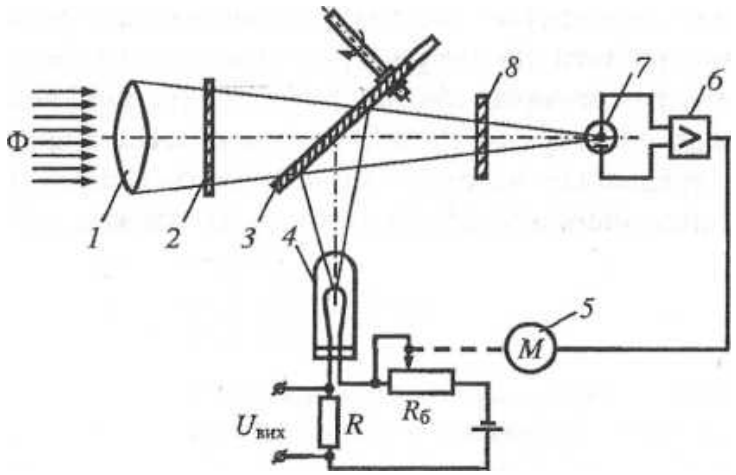


Рис. 4.45. Схема фотоелектричного автоматичного пірометра:
1 – об'єктив; 2 – поглинальний світлофільтр; 3 – обертове дзеркало; 4– пірометрична лампа; 5 – електродвигун; 6 – електронний підсилювач; 7 – фотоелемент; 8 – селективний світлофільтр

Пірометри спектрального відношення «Веселка» вирізняються високими значеннями чутливості та точності. Діапазон вимірювання різних модифікацій цих пірометрів, що виробляються в Україні, становить 750...2900 °С, основна похибка – 0,6 %.

Пірометри часткового випромінювання «Смотрич» забезпечують вимірювання температури в діапазоні 30...3500 °С з граничнодопустимою основною похибкою 1...2.5% (залежно від моделі пірометра та діапазону вимірювання).

Контрольні запитання

1. Що характеризує температура?
2. Що таке рівняння шкали температур?
3. На підставі чого побудовано термодинамічну шкалу температур Кельвіна?
4. На чому засновано принцип дії вимірювальних перетворювачів температури з біметалевими термоелементами?
5. На чому ґрунтується принцип дії манометричних термометрів?
6. Який закон закладено в основу принципу роботи газових манометричних термометрів?
7. Поясніть принцип дії зрівноваженого моста постійного струму.
8. Поясніть принцип дії автоматичних зрівноважених мостів.
9. Поясніть принцип дії логометрів.
10. Що таке ефект Пельтьє?
11. Що таке ефект Томсона?

12. Що таке ефект Зеебека?

13. Який вигляд має основне рівняння термопари?

14. Які способи з’єднання термоелектричних перетворювачів ви знаєте?

15. Що таке номінальна статична характеристика термоелектричного перетворювача?

16. Для чого використовують подовжувальні або компенсаційні проводи?

17. Сформулюйте вимогу до термоелектричних властивостей компенсаційних проводів.

18. На чому ґрунтується принцип дії пірометрів випромінювання?

19. Поясніть призначення елементів у схемі пірометра повного випромінювання.

РОЗДІЛ 5

ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ

5.1. Загальні відомості. Візуальні засоби вимірювання рівня

Вимірювання рівня рідких (сипких) речовин – дуже поширений вимірювальний процес у сільськогосподарської та інших галузях промисловості.

Рівнем називають висоту заповнення технологічного апарата робочим середовищем – рідиною або сипким матеріалом. Рівень робочого середовища є технологічним параметром, інформація про який потрібна для контролю за режимом роботи технологічного апарата, а подеколи – для керування технологічним процесом. Вимірюванням рівня можна отримувати також інформацію про масу рідини, що зберігається в резервуарах. Подібну інформацію широко використовують для проведення товарооблікових операцій та керування виробничим процесом.

Рівень вимірюють в одиницях довжини. Засоби вимірювання рівня називають рівнемірами. Розрізняють рівнеміри, призначені для вимірювання рівня робочого середовища, визначення маси рідини в технологічному апараті та для сигналізації граничних значень рівня робочого середовища.

За діапазоном вимірювання розрізняють рівнеміри широкого та вузького діапазонів. Рівнеміри широкого діапазону (границі вимірювання 0,5...30 м, рідше – до 50 м) призначені для проведення товарооблікових операцій, рівнеміри вузького діапазону (границі вимірювання 0 ± 100 мм і більше) зазвичай використовують у системах автоматичного регулювання та сигналізації.

За характером роботи рівнеміри можуть бути неперервної та періодичної дії. Останні спрацьовують у разі досягнення певного рівня і використовуються для сигналізації граничних значень рівня (сигналізатори) або для вмикання (вимикання) насосів, відкривання (закривання) запірної арматури (датчики-реле).

У багатьох галузях промисловості рівень вимірюють різними за принципом дії рівнемірами, з яких найбільшого поширення набули поплавкові, буйкові, гідростатичні, електричні, ультразвукові, фотоелектричні, радіоізотопні, радарні, хвилеводні та вагові.

Вибираючи рівнемір, необхідно враховувати такі фізичні та хімічні властивості рідини, як температура, абразивні властивості, в’язкість, електрична провідність, паро- та піноутворення, радіоактивність, хімічна агресивність і т. ін. Попри це, варто брати до уваги робочі умови в резервуарі або біля нього: тиск, вакуум, нагрівання, охолодження, спосіб заповнення або спорожнення (пневматичний чи механічний) резервуара, наявність пристроїв для стабілізації чи перемішування, вогне- та вибухонебезпечність, простоту монтажу рівнеміра тощо.

Найпростіші вимірювачі рівня рідини – ***візуальні засоби,*** до яких належать вимірювальні лінійки та рейки, рулетки з лотами (сталевими

циліндрами, прикріпленими до нижнього кінця мірної стрічки) та рівнемірні стекла, які врізають безпосередньо в стінку апарата або складають у вигляді виносного апарата (рис. 5.1). Застосування останніх ґрунтується на використанні закону сполучених посудин.

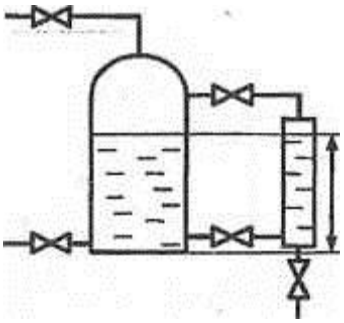


Рис. 5.1. Рівнемірне скло (виносний апарат)

Через низьку механічну міцність рівнемірне скло виробляють завдовжки не більше 0,5 м. Тому для вимірювання рівня в резервуарах встановлюють декілька рівнемірних стекол так, щоб по висоті вони перекривали одне одного.

Абсолютна похибка вимірювання рівня за допомогою рівнемірних стекол становить ±(1...2) мм. Рівнемірні стекла застосовують за температури до 300 °С і тиску до 2,94 МПа.

5.2. Поплавкові рівнеміри

В основу роботи цих вимірювачів (рівнемірів і датчиків-реле) покладено закон Архімеда, за яким побудовано як вимірювачі з постійною виштовхувальною силою (та глибиною занурення) – поплавкові, так і зі змінною – буйкові.

Поплавковий рівнемір (рис. 5.2) складається з поплавка 1 (зазвичай порожнисте тіло кулеподібної або циліндричної форми діаметром 80...200мм), підвішеного на гнучкому тросі, перекинутому через ролики 2. На другому кінці троса закріплено тягар-противагу 3 для забезпечення постійного натягу троса. У нижній частині противаги закріплено стрілку, що вказує на шкалі 4 виміряне значення рівня рідини в резервуарі. Для розрахунків поплавкових рівнемірів підбирають такі конструктивні параметри поплавка, які забезпечують стан рівноваги системи «поплавок - противага» тільки за певної глибини занурення поплавка $h_{\text{п}}$.

Для статичного положення вимірювача рівняння рівноваги сил, прикладених до поплавка, матиме вигляд (якщо знехтувати вагою троса і тертям у роликах)

$$G_{\text{п}} = N_A + N_g, \qquad (5.1)$$

де $G_{\text{п}}$ - сила тяжіння поплавка; $N_A = S_{\text{п}}\ h_{\text{п}}\ \rho_{\text{р}}\ g$ – виштовхувальна (архімедова) сила, що діє на поплавок з боку рідини; N_g – сила тяжіння тягара-противаги *3;* $S_{\text{п}}$ – площа поперечного перерізу поплавка *1;* $h_{\text{п}}$ – глибина занурення поплавка (змінюється зі зміною густини і температури рідини); $\rho_{\text{р}}$ – густина контрольованої рідини.

Зі зміною рівня на поплавок діятиме додаткова виштовхувальна сила, зумовлена додатковим зануренням поплавка на глибину $h_д$. Тоді рівняння рівноваги матиме вигляд (знак ± відповідає знакові зміни рівня)

$$G_п = N_g \pm S_п h_д \rho_р g \, .$$

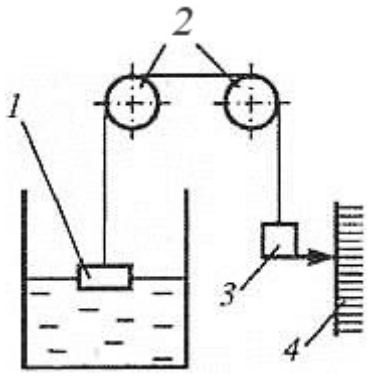


Рис. 5.2. Схема поплавкового рівнеміра:
1 – поплавок; 2 – ролики; 3 – тягар-противага; 4 – шкала

Підвищення рівня рідини змінює глибину занурення поплавка й на нього діє додаткова виштовхувальна сила. У результаті рівність (5.1) порушується й тягар-противага опускається вниз доти, доки глибина занурення поплавка не буде дорівнювати $h_п$. Зі зниженням рівня виштовхувальна сила, що діє на поплавок, зменшується, і поплавок 7 починає опускатися вниз доти, доки глибина його занурення не стане рівною $h_п$.

Досить простий механічний спосіб передавання даних про рівень заповнення відкритих резервуарів за допомогою системи тросів (у замкнених резервуарах – уведенням через сальник) придатний лише для невеликих відстаней (рис. 5.2).

Однак для більшості випадків як у відкритих, так і в закритих резервуарах застосовують системи електричного передавання даних, особливо, якщо результат вимірювання надходить в електронні вторинні прилади, регулятори чи обчислювальні пристрої. Для передавання інформації про значення рівня рідини в резервуарі застосовують різні системи передавання сигналів, зокрема сельсинну (вісь сельсина-датчика кінематично зв'язана з роликом *2*, який обертається під час переміщення троса, а вісь сельсина-приймача сполучена з лічильним механізмом), потенціометричну (вісь напрямного ролика з'єднується з повзунком потенціометра), фотоелектричну (перфорована мірна стрічка, до якої кріпиться поплавок, проходить між випромінювачем та приймачем оптопари, що формує імпульси, кількість яких пропорційна зміні рівня) тощо.

Принцип постійного занурення поплавка широко використовують для вимірювання рівня в широкому і вузькому діапазонах зміни рівня (виробляються промислові рівнеміри з мінімальним 1,25 м і максимальним 30 м діапазонами та допустимими похибками від ±1 до ± 8 мм - залежно від моделі). Виробляють також поплавкові сигналізатори (датчики-реле), міні-

мальний діапазон вимірювання яких становить ±10 мм, максимальний – ±200 мм.

5.3. Буйкові рівнеміри

Робота буйкового рівнеміра грунтується на використанні виштовхувальної (архімедової) сили, що діє на занурене у рідину циліндричне осесиметричне тіло (буйок), довжина якого значно більша від його діаметра, а питома вага матеріалу буйка значно більша від питомої ваги контрольованої рідини.

Такий буйок 1 (рис. 5.3), вільно підвішаний на пружині 2, служить масштабним перетворювачем великих змін рівня у порівняно невеликі переміщення *x* буйка та ЧЕ проміжного перетворювача (ДТП).

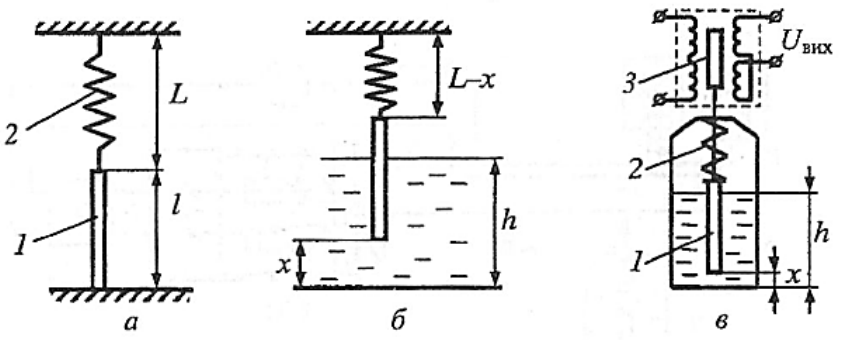


Рис. 5.3. Схеми буйкового рівнеміра:
а – розрахункова за нульового значення виштовхувальної сили; *б* – за ненульового значення виштовхувальної сили;
в – з ДТП: 1 – буйок; 2 – пружина; 3 – ЧЕ ДТП

Буйкові рівнеміри використовують для вимірювання рівня як у широкому діапазоні, так і у вузькому. Зрівноважувальна сила розтягування пружини цих вимірювачів у разі зміни рівня компенсується частковим зануренням буйка в рідину.

На рис. 5.3, *а* показано умову рівноваги буйка 1 без вимірюваної рідини, а отже, й виштовхувальної сили: $S_б l \rho_б g = Lc$, де $S_б$ – площа поперечного перерізу буйка; $\rho_б$ – питома вага матеріалу буйка; g – прискорення сили тяжіння; c – жорсткість пружини *2*.

Для рис. 5.3, *б* умова рівноваги буде такою: $S_б l \rho_б g - (h-x) S_б \rho_б g = (L-x)c$, де $\rho_р$ – густина рідини; h – вимірюваний рівень. Розв'язуючи разом ці рівняння, знайдемо, що деформація пружини чи зміна положення поплавка x визначають зміну рівня: $h = kx$, де $k = 1 + c / (S_б \rho_р g)$.

Якщо буйок 1 механічно з'єднаний з ЧЕ 3 проміжного перетворювача (рис. 5.3, *в*), то ЧЕ перетворювача (індуктивного, диференціально-трансформаторного, пневматичного тощо), переміщуючись на величину x, відповідно змінює вихідні індуктивність, ЕРС чи пневмосигнал.

Вторинними вимірювальними приладами рівнемірів з буйковим перетворювачем можуть бути прилади типу КПД чи КСД (з компенсаційним вимірювальним колом на базі ДТП).

Останнім часом широко застосовують поплавкові та буйкові рівнеміри із силовою компенсацією, а також рівнеміри статичного зрівноважувального перетворення. На відміну від попередніх буйкових рівнемірів, які працюють за принципом компенсації зміщення з усіма його недоліками, зумовленими виникненням значних реактивних сил, вони реалізують принцип компенсації сили. Тому реактивні сили в них настільки малі (через мізерність зміщення), що ними нехтують.

Залежно від виду використаного вторинного перетворювача вихідною величиною в таких вимірювачах є електричний або пневматичний сигнал. Схему буйкового рівнеміра з уніфікованим вихідним струмовим сигналом 0.. .5 або 0...20 мА показано на рис. 5.4.

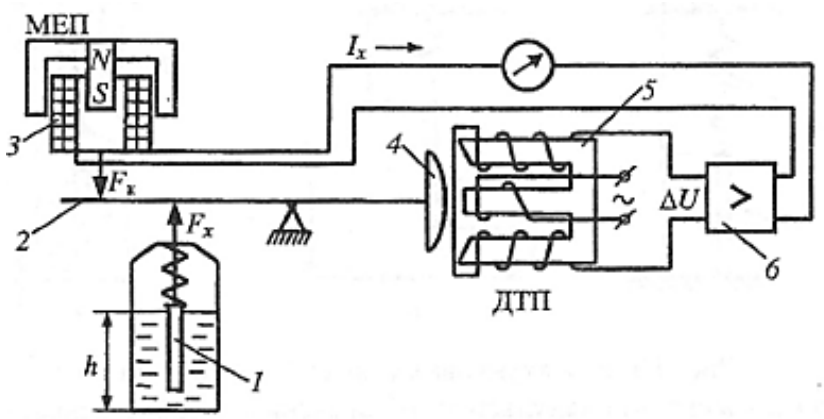


Рис. 5.4. Схема буйкового рівнеміра зрівноважувального перетворення:
1 – буйок; 2 – коромисло; 3 – вимірювальна обмотка магнітоелектричного перетворювача (МЕП); 4 – рухоме осердя ДТП; 5 – нерухома частина магнітопроводу ДТП; 6 – підсилювач

Якщо занурити буйок 1 в контрольовану рідину, на нього буде діяти виштовхувальна сила F_x, що переміщує буйок. Це переміщення за допомогою коромисла 2 спричиняє повертання осердя 4 ДТП. Нерухому частину магнітопроводу виконано у вигляді Ш-подібного осердя 5. На його середній стрижень намотано первинну намагнічувальну обмотку, що живиться від джерела змінної напруги. Дві ідентичні вимірювальні обмотки, намотані на крайні стрижні, утворюють два ідентичні перетворювальні елементи. Обмотки з’єднані послідовно та зустрічно.

Диференціально-трансформаторний перетворювач побудований так, що за нульового значення вимірюваного рівня чи деякого його номінального значення рухоме осердя 4 займає симетричне відносно обох перетворювальних елементів положення, наведені в них ЕРС будуть однаковими, а їх різниця дорівнюватиме нулю. Змінення вимірюваного рівня та відповідне переміщення рухомого осердя 4 змінюють потоки в окремих пере-

творювальних елементах і наведені в них ЕРС. З'являється певна різниця ЕРС, що подається на підсилювач 6, вихідна напруга якого після перетворення змінного струму в постійний надходить до вимірювальної обмотки зворотного магнітоелектричного перетворювача.

Струм I_x, що проходить через вимірювальну обмотку 3, взаємодіючи з полем постійного магніту, створює компенсувальну силу $F_к$, спрямовану назустріч виштовхувальній силі F_x, яка діє на буйок 1. Значення струму I_x, який проходить у момент рівноваги цих сил, буде мірою вимірюваного рівня h.

У промисловому буйковому рівнемірі з пневматичним вихідним сигналом, спрощену схему якого показано на рис. 5.5, використано пневмосиловий перетворювач.

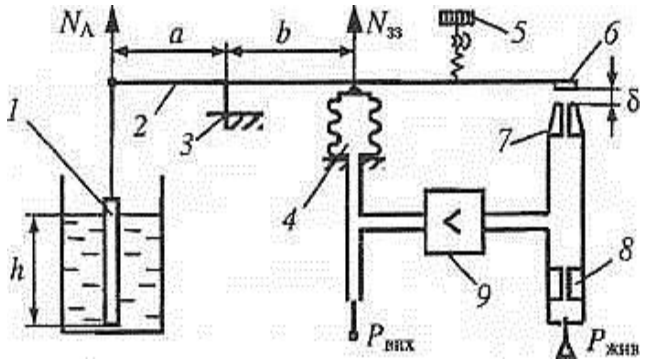


Рис. 5.5. Буйковий рівнемір із пневматичним вихідним сигналом:
1 – буйок; 2 – важіль; 3 – гнучка опора; 4 – сильфон зворотного зв'язку; 5 – коректор нуля; 6,7,8 – сопло, заслінка і постійний пневмодросель механопневматичного перетворювача типу «сопло – заслінка»; 9 – пневмопідсилювач

Без контрольованої рідини вага буйка компенсується зусиллям пружини коректора нуля (0,02 МПа) 5. Але в разі занурення частини буйка 1 в контрольовану рідину вихідний сигнал формуватиметься виштовхувальною силою NA, пропорційною вимірюваному рівневі h:

$$N_A = \rho_р S_б h g.$$

Дія виштовхувальної сили N_A приведе до виникнення на важелі 2 моменту $M_{вх}=\alpha N_A=\alpha\rho_р S_б h g$, пропорційного висоті рівня h. Це зумовить зміщення важеля *2* і зміну розміру зазору δ між заслінкою 6 і соплом 7, а також до відповідної зміни вихідного сигналу $P_{вих}$.

У сильфоні зворотного зв'язку 4 сформується сила зворотного зв'язку

$$N_{з.з} = F_{еф} P_{вих}$$

(де $F_{еф}$ – ефективна площа сильфона 4), момент якої $M_{з.з} = bN_{з.з}$ буде спрямований проти моменту $M_{вх}$. Рух важеля 2 припиниться, коли ці моменти зрівняються, і система досягне нового стану рівноваги: $M_{вх} = M_{з.з}$.

Звідси $\alpha\rho_р S_б hg = bF_{еф}P_{вих}$, а отже,

$$P_{вих} = kh,$$

де $k = \alpha\rho_р S_б hg/(b\,F_{еф})$.

Замість пневмосилового перетворювача можна застосовувати електросиловий чи тензометричний перетворювачі.

Буйкові перетворювачі (датчики-реле) рівня можна також використовувати у схемах керування та сигналізації. Одну з найпростіших систем автоматичної сигналізації рівня води в резервуарі показано на рис. 5.6.

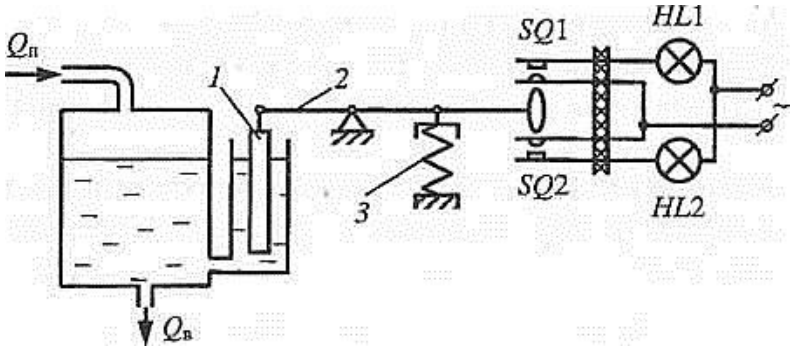


Рис. 5.6. Схема сигналізації рівня води в резервуарі на базі буйкового датчика-реле:
1 – буйок-перетворювач; 2 – важіль; 3 – пружина;
SQ1 та *SQ2* – контакти реле; *HL1* та *HL2* – сигнальні лампи

У разі відхилення рівня рідини від норми, засвітиться відповідна сигнальна лампа: у разі зменшення рівня засвітиться *HL*1, а в разі збільшення – *HL*2. Як і поплавок, буйок можна розміщувати або в самому резервуарі (апараті) з контрольованою рідиною, або у виносній камері (вона слугує також демпфером динамічних збурень у контрольованій рідині, спричинених роботою насосів).

Буйкові засоби вимірювання застосовують за температури робочої рідини від мінус 50 до +400 °С і тиску до 16 МПа (температура навколишнього повітря – від мінус 50 до +50 °С). Діапазон вимірювання до 16 м, класи точності – 1,0 і 1,5.

5.4. Гідростатичні рівнеміри

Вимірювання цими приладами рівня рідини з постійною густиною зводиться до вимірювання гідростатичного тиску, створюваного стовпом рідини. Серед гідростатичних рівнемірів найбільшого поширення набули пневмометричні рівнеміри та рівнеміри безпосереднього вимірювання гідростатичного тиску стовпа рідини, наприклад, за допомогою дифманометра.

Пневмометричне вимірювання рівня рідин (рис. 5.7) основане на ідеї гідравлічного затвора, який дозволяє встановлювати граничний тиск у пневматичній системі

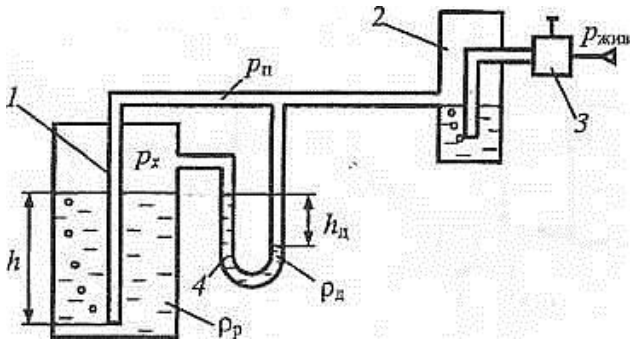


Рис. 5.7. Гідростатичний (пневмометричний) вимірювач рівня:
1 – пневмометрична трубка; 2 – контрольна посудина; 3 – редуктор;
4 – дифманометр

Для вимірювання рівня використовують повітря чи інертний газ, який під тиском $p_р$ продувається через пневмометричну трубку 1 (побутує також назва «п'єзометрична трубка»), занурену в рідину:

$$p_п > p_x + ρ_р g h,$$

де p_x – тиск над рідиною в резервуарі (у відкритих резервуарах $p_x = 0$); h – висота рівня рідини над нижнім зрізом пневмометричної трубки.

Повітря (інертний газ) неперервно продувається (барботується) крізь шар рідини h. Кількість цього повітря регулюють редуктором 3 і контролюють за інтенсивністю барботажу (близько 60 бульбашок за хвилину) у контрольній посудині 2. Рівень рідини визначають за усталеним тиском рп у системі: $p_п - p_x = ρ_р g h$, звідки

$$h = (p_п - p_x)/(ρ_р g).$$

Тиск $p_п - p_x$ визначають за різницею рівнів $h_д$ рідини в дифманометрі 4:

$$p_п - p_x = ρ_р g h_д,$$

де $ρ_д$ – густина робочої рідини в дифманометрі 4.

У результаті вимірюваний рівень визначають за залежністю

$$h = k h_д,$$

де $k = ρ_д / ρ_р$.

Такі вимірювачі рівня (і тиску) досить точні. Їх вади: постійний барботаж повітря в апарат, несприятлива дія (окиснення) кисню повітря на контрольовану рідину, залежність точності вимірювання від в'язкості (температури) рідини.

Різновидом гідростатичних рівнемірів є рівнеміри, основу яких складають дифманометри будь-якої системи, що вимірюють гідростатичний тиск стовпа рідини в резервуарі (у відкритих резервуарах можна використовувати манометри). Дифманометрами можна вимірювати рівень у відкритих (рис. 5.8, *а*) і закритих (рис. 5.8, *б*) резервуарах (в останніх рідина може перебувати як під дією тиску пари p_x так і під дією розрідження).

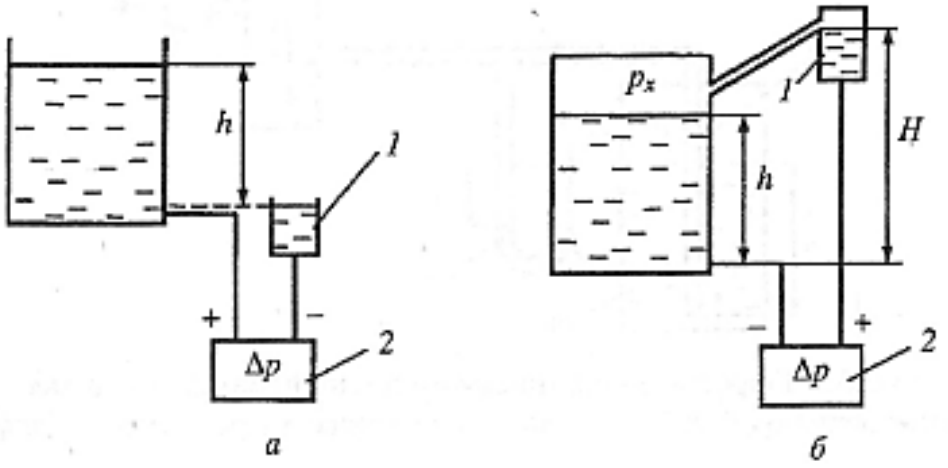


Рис. 5.8. Схеми вимірювання рівня дифманометром у резервуарах:
а – відкритих; *б* – закритих: 1 – зрівнювальна посудина; 2 – дифманометр

Щоб вимірювати рівень дифманометром, необхідно використовувати зрівнювальну посудину *1*, заповнену до визначеного рівня тією ж рідиною, що й у резервуарі.

Вимірюваний рівень h у відкритому резервуарі за постійної густини рідини визначають перепадом тиску на дифманометрі Δp*:*

$$h = k\Delta p, \tag{5.2}$$

де k= $1/(\rho_р g)$.

У разі вимірювання рівня в закритих резервуарах рівняння (5.2) набуде вигляду

$$h = H - k\Delta p.$$

Гідростатичні (дифманометричні) рівнеміри широко застосовують завдяки їх високій надійності, точності та простоті обслуговування.

5.5. Електричні рівнеміри

В основу роботи електричних рівнемірів покладено залежність деяких електричних величин від властивостей вимірюваного середовища: ємності конденсатора, електропровідності, індуктивності тощо. Серед електричних рівнемірів найбільшого поширення набули ємнісні та кондуктометричні (омічні), останні – тільки для сигналізації граничних значень рівня.

Ємнісні рівнеміри. Вимірювання рівня ємнісним методом ґрунтується на змінюваності ємності зануреного в рідину конденсатора внаслідок перерозподілу діелектричних проникностей контрольованої рідини і парогазового середовища над нею. Для плоского конденсатора (рис. 5.9, *а*), зануреного в рідину, ємність $C = C_h + C_{H-h}$, де C_h, C_{H-h} – ємності відповідно зануреної та незануреної в рідину частин конденсатора.

Складові останнього виразу визначають так:

$$C_h = \varepsilon_р hb/a\,;\; C_{H-h} = \varepsilon_п (H-h)b/a,$$

де $\varepsilon_р$, $\varepsilon_п$ – діелектрична проникність відповідно рідини і парогазового середовища (для більшості парів рідин і газів $\varepsilon_п$ близька до одиниці); h – висота зануреної частини конденсатора (вимірюваний рівень); *H, b, a* – відповідно

висота, ширина пластин конденсатора та відстань між ними.

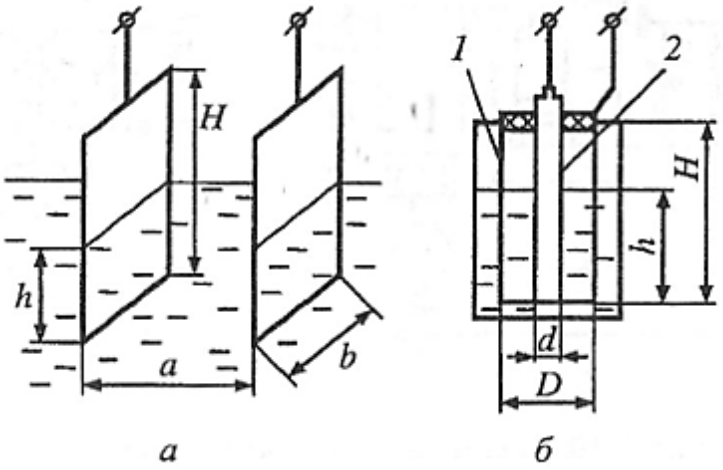


Рис. 5.9. Схеми плоского (а) та циліндричного (б) ємнісних рівнемірів

Тоді сумарна ємність

$$C = C_0 + kh,$$

де, $C_0 = \varepsilon_0\varepsilon_п Hb/a$; $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м – діелектрична стала (абсолютна діелектрична проникність вакууму); $k = b(\varepsilon_р - \varepsilon_п)/a$

Електричну ємність рівнеміра з коаксіально розташованими циліндричними електродами (рис. 5.9, *б*) визначають за виразом

$$C = C_1\left[1 + \left(\varepsilon_р - 1\right)h/H\right],$$

де $C_1 = C_0 + 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_п H / [\ln(D/d)]$ - початкова ємність конденсатора на робочій ділянці висотою H, заповненій парогазовою сумішшю; d,D – діаметри відповідно внутрішнього та зовнішнього електродів; C_0 – ємність прохідного ізолятора.

Значного поширення набули також різноманітні схеми датчиків-реле рівня ємнісного типу, призначені для сигналізації та позиційного регулювання рівня. Одну з таких схем зображено на рис. 5.10, *а*.

Принципова схема електронного блока ємнісного датчика-реле містить генератор високої частоти (ВЧ), складений на мікромініатюрному ламповому подвійному тріоді T та з'єднаний електрично з ємнісним ПВП. Схема генератора налагоджується підстроювальним конденсатором C_1 таким чином, щоб зі зміненням ємності ПВП $C_п$, зумовленим зміною вимірюваного рівня, відбувався зрив високочастотних коливань, у результаті чого зростав би вихідний струм в анодному колі лампи-тріода.

Навантаженням анодного кола є вихідне реле, що спрацьовує внаслідок зміни частоти коливань генератора чи (що те саме) рівня рідини. До контактів блока реле можна підключити пристрої сигналізації (звукової, світлової) чи пристрої керування (електродвигуни, електромагнітні клапани тощо). Для забезпечення сигналізації (керування) у точках H_{Cmax} і H_{Cmin}. застосовують два ємнісні ПВП і два генератори.

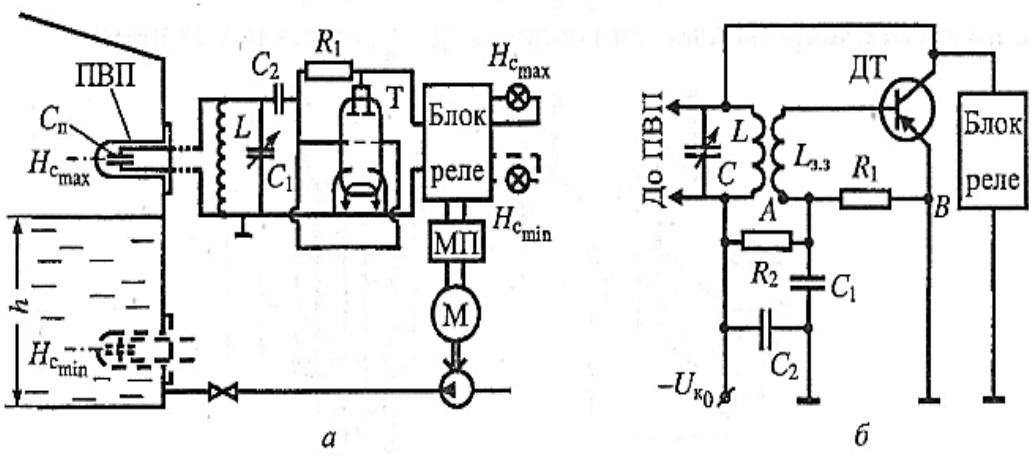


Рис. 5.10. Схеми ємнісних датчиків-реле рівня

Генератори ВЧ будують також на базі транзисторних гетеродинів (малопотужні ВЧ-генератори), одну з можливих схем яких – із трансформаторним зворотним зв'язком – показано на рис. 5.10, б. Для отримання стійких коливань із заданим діапазоном частот у гетеродинах застосовують транзистори з високими граничними частотами, наприклад, германієві дифузійні тріоди (схему блока реле також побудовано на транзисторах).

Транзисторний генератор по суті являє собою підсилювач власних коливань. Підсилення напруги, прикладеної до бази-емітера, створює в *LC*-контурі незагасальні високочастотні коливання, що, як і в схемі на рис. 5.10, *а,* зриваються зі зміненням ємності $C_п$ ПВП, зумовленим зміною вимірюваного рівня.

Подільник напруги R_1, R_2 створює на резисторі R_1 сталу напругу, необхідну для забезпечення початкової інжекції дірок у базу транзистора *ДТ*. Конденсатор C_1, який шунтує резистор R_1, зменшує опір змінному струмові між точками *A* та *B,* чим дозволяє передати більшу частину напруги з котушки зворотного зв'язку $L_{з.з}$ на базу-емітер транзистора. Конденсатор C_2 відводить змінну складову колекторного струму від джерела живлення, підключеного до клеми – U_{K_0} та корпуса.

Практичні схеми транзисторних гетеродинів складніші за наведену на рис. 5.10, *б,* позаяк, окрім зображених на ній основних елементів, до них входять ще й додаткові – сполучувальні, підстроювальні та блокувальні конденсатори, резистори, що забезпечують стійкість роботи схеми, комутувальні пристрої тощо.

Ємнісні сигналізатори мають похибку ±10 мм.

Ємнісні рівнеміри випускаються з класами точності 0,5; 1,0; 2,5; мінімальний діапазон вимірювання становить 0...4 м, максимальний – 0...20м; тиск робочого середовища – 2,5... 10 МПа, температура – мінус 60...+100 °С або +100...+250 °С. Ємнісні рівнеміри для сипких матеріалів мають клас точності 2,5 та діапазон вимірювання 4...20 м.

Кондуктометричні (омічні) сигналізатори рівня. Рівнеміри цього виду призначені для сигналізації рівня електропровідних рідких і сипких речовин із питомою електропровідністю понад 10^{-3} См/м. Схему сигналізатора верхнього граничного рівня рідини показано на рис. 5.11, *а*. У разі досягнення рівнем граничного значення H_c замикається електричне коло між електродом 1 і корпусом технологічного апарата, заживлюючи обмотку реле 2, контакти якого ввімкнені в схему сигналізації чи керування. При цьому нормально замкнені контакти розмикаються (вимикаючи, наприклад, насос подачі рідини в резервуар), а нормально розімкнені – замикаються (вмикаючи, наприклад, насос відкачування рідини з резервуара).

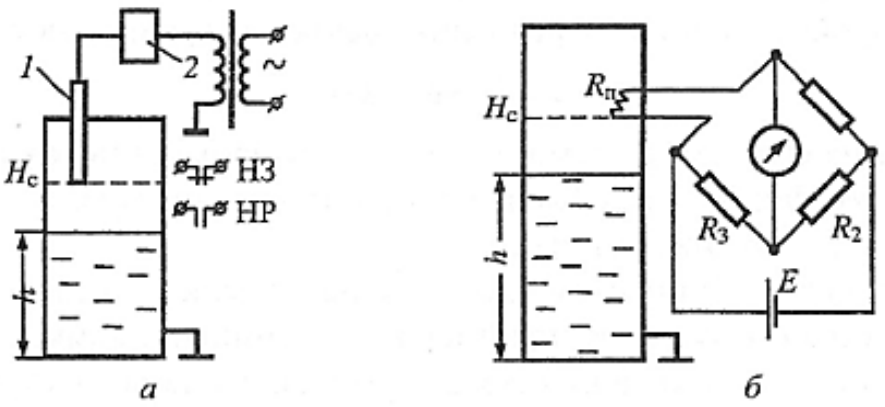


Рис. 5.11. Схеми омічних датчиків-реле рівня:
НЗ – нормально замкнені контакти; НР – нормально розімкнені контакти

Електроди, застосовувані в кондуктометричних сигналізаторах рівня, виготовляють зі сталі спеціальних марок або вугілля (для агресивних середовищ). При цьому вугільні електроди використовують тільки для вимірювання рівня рідин.

У кондуктометричному сигналізаторі рівня, схему якого показано на рис. 5.11, *б*, ЧЕ – підігрівний дротяний терморезистор $R_п$. Швидкість тепловідведення від $R_п$, який нагрівається струмом, що проходить через нього, залежить від типу середовища, в якому він перебуває. А позаяк електричний опір терморезистора $R_п$ залежить від його температури, то величина цього опору буде змінюватися в разі проходження його через межу поділу фаз – рідини та газу. Якщо підігрівний терморезистор входить в одне із плечей моста, то спричинена зміненням середовища зміна опору $R_п$ виведе міст зі зрівноваженого (під час перебування терморезистора в газі) стану, і на його виході з'явиться сигнал, який і буде використано для визначення рівня. У разі використання замість дротяного терморезистора напівпровідникового – термістора – величина вихідного сигналу може значно зрости.

5.6. Фотоелектричні рівнеміри

Модифікації таких рівнемірів застосовують тільки для визначення дискретних значень рівнів рідини. В одній із модифікацій (рис. 5.12, *а*) використовують фізично розділені фотоелектричні джерела та детектори (приймачі). Промінь світла між ними переривається, коли рівень рідини перевищує висоту установлення цих пристроїв. Насправді промінь світла не переривається повністю, а лише істотно послаблюється.

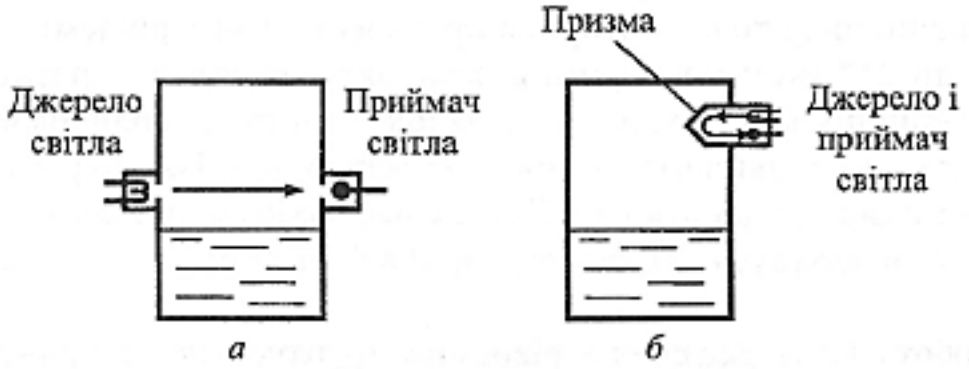


Рис. 5.12. Фотоелектричні рівнеміри з розділеними (*а*) та розміщеними в одному корпусі (*б*) випромінювачем і приймачем світла

У другій модифікації (рис. 5.12, *б*) застосовують розміщені в одному корпусі випромінювач світла, детектор і призму, висунену зі стінки всередину резервуара. Коли корпус перетворювача з призмою на кінці перебуває в газовому середовищі, світло від джерела зазнає внутрішнього відбиття й потрапляє на детектор. Як тільки рідина покриває корпус, змінюється коефіцієнт відбиття між призмою й навколишнім середовищем (призму «заливає»), і промінь світла вже не відбивається від призми до детектора Із технічного погляду в таких приладах цілком можливо використовувати не тільки випромінювання видимого світла, але й інфрачервоне чи ультрафіолетове випромінювання.

5.7. Радарні рівнеміри

Практика використання радарних рівнемірів показує, що на сьогодні вони мають найкращі експлуатаційні характеристики і набувають дедалі більшої популярності у світі. Вони високонадійні, вирізняються високою точністю вимірювання рівня, не мають у своєму складі елементів конструкції, які контактують безпосередньо з вимірюваним продуктом, не потребують технічного обслуговування; їх справність перевіряють без проведення демонтажу. Радарні рівнеміри нечутливі до температури процесу, зміни щільності, в’язкості та діелектричних властивостей, до агресивності контрольованої речовини. Крім того, радарний промінь вільно проникає крізь шари піни й ізолювальні прокладки, на нього не впливають зміни об’єму заповненого парами простору резервуара. Ці рівнеміри добре працюють у турбулентних, аерованих, агресивних і в’язких рідинах, а також у густих пастах або суспензіях, зокрема й таких, які містять тверді частинки.

Основа радарного рівнеміра – малогабаритний ПВП (радіолокатор з рупорною антеною), установлений на даху резервуара. Відсутність контакту між ПВП і вимірюваним продуктом забезпечує високу надійність роботи рівнеміра. У радарних рівнемірах використовується надвисока робоча частота радіохвилі (від 10 до 100 ГГц – залежно від моделі вимірювача), що дозволяє їх застосовувати у важких умовах (наявність суспензії, туману, пари, пилу тощо). Ширина променя в різних рівнемірах становить від 4° до 25° (вузький промінь дозволяє зменшити паразитні відбиття від внутрішніх конструкцій - мішалок, фільтрів, теплообмінників, сходів тощо – та підвищити точність вимірювань). Натепер радарні рівнеміри успішно працюють на об’єктах енергетичної, целюлозно-паперової, харчової, сільськогосподарської та інших галузей промисловості.

Робота ПВП радарного рівнеміра грунтується на принципі безконтактного радіолокаційного вимірювання відстані $H - h$ до рівня розділу фаз: повітряне середовище – контрольований продукт (рис. 5.13). Випромінена антеною радіохвиля відбивається від поверхні продукту й через певний час, який залежить від швидкості її поширення та відстані до поверхні продукту, повертається в антенний тракт. У результаті на виході створюється сигнал, частота якого дорівнює різниці частот прийнятого та випроміненого сигналів. За різницею частот визначають відстань до продукту та обчислюють рівень наповнення резервуара.

Технологія вимірювання радарними рівнемірами у поєднанні з методом неперервного частотно-модульованого випромінювання дозволяють застосувати для обробки сигналу засоби спектрального аналізу, що забезпечують високоефективне придушення паразитних відбиттів, а також завад, спричинених коливанням поверхні вимірюваного продукту та забрудненнями антени радіолокатора.

Діапазон вимірювання рівня радарних рівнемірів становить 0,6...30 м (деякі типи рівнемірів – до 50 м), похибки вимірювання рівня рідин – від ±1 до ±5 мм (для сипких продуктів ±50 мм – залежно від стану поверхні).

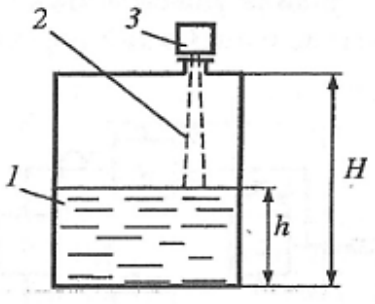


Рис. 5.13. Схема вимірювання рівня радарним рівнеміром:
1 – контрольований продукт; 2 – радіопромінь; 3 – радіолокатор

5.8. Ультразвукові (акустичні) рівнеміри

Ці рівнеміри забезпечують вимірювання рівня без контакту з вимірюваним середовищем, а також у важкодоступних місцях. Вони придатні для

вимірювання рівня як рідин, так і сипких матеріалів. Агресивність, чистота та фізико-хімічні властивості речовин (в'язкість, густина, схильність до кристалізації) не мають особливого значення. Дія цих приладів ґрунтується на принципі відбиття ультразвукових хвиль від межі поділу газ – рідина. В ультразвукових рівнемірах ультразвукові хвилі відбиваються з боку рідини, а в акустичних – з боку газового середовища (останні застосовують також як сигналізатори).

Принципову схему акустичного рівнеміра зображено на рис. 5.14. Прилад складається з електронного блока, п'єзоелектричного перетворювача (випромінювача) 3 і вторинного приладу (автоматичного потенціометра) *6*. Електронний блок складається з генератора 1, який задає частоту повторення імпульсів, генератора імпульсів 2, що надсилаються у контрольоване середовище, підсилювача 4, вимірювача часу 5.

Генератор 1 керує роботою генератора імпульсів 2 та схемою вимірювання часу. Частота імпульсів – 300 Гц. Генератор 2 формує короткі імпульси для збудження п'єзоелектричного випромінювача 3. Електричний імпульс, перетворений в ультразвуковий за допомогою п'єзоелектричного випромінювача, поширюється в парогазовому середовищі, відбивається від межі поділу повітря – рідина, повертається назад і сприймається через деякий час тим же п'єзоелементом *3*, який перетворює його в електричний імпульс.

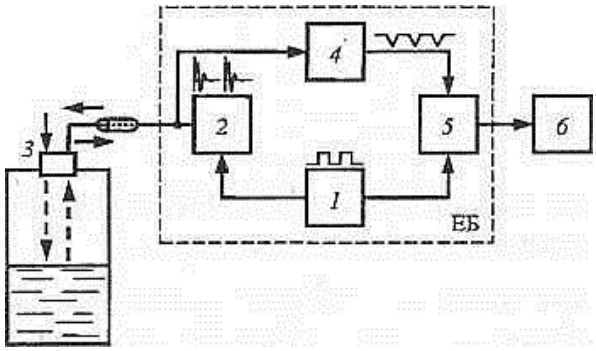


Рис. 5.14. Принципова схема акустичного рівнеміра:
ЕБ – електронний блок; 1 – генератор; 2 – генератор імпульсів;
3 – п'єзоелектричний випромінювач; 4 – підсилювач; 5 – вимірювач часу;
6 – вторинний прилад

Обидва імпульси (посланий і відбитий) розділені в часі, надходять на підсилювач 4. Сформована вимірювачем часу 5 постійна напруга, пропорційна часові запізнення відбитого сигналу (а отже, й вимірюваному рівневі), подається на вторинний прилад 6. Таким чином, рівень рідини в резервуарі визначається за часом запізнення відбитого сигналу відносно посланого.

Акустичні рівнеміри виробляють у вибухонебезпечному варіанті з класами точності 1,0 і 1,5, максимальним діапазоном вимірювання 0...30 м. Температура контрольованого середовища становить 10...50 °С, тиск – до 4 МПа.

5.9. Вагові рівнеміри

Як первинні перетворювачі у вагових рівнемірах використовують різні вагові пристрої (динамометри). Застосуванню динамометрів для вимі-

рювання рівня заповнення резервуарів будь-якого типу слід надати перевагу в таких випадках:

– заповнення резервуарів агресивними матеріалами, щоб уникнути контакту матеріалу з датчиком;

– утворення нерівностей у резервуарах (це характерно для сипких речовин), які за інших методів вимірювання призводять до похибок;

– вимірювання рівня в змішувальних пристроях, де вимірювальні органи інших систем вимірювання створюють перешкоди робочому процесові;

– підсумовування результатів вимірювань у декількох резервуарах, розташованих у різних місцях.

Цей метод зручно застосовувати там, де підвішування резервуара до динамометра або його установлення на динамометр не пов’язані з конструктивними труднощами. Він придатний насамперед для грубих сипких матеріалів: зважується резервуар, на підставі чого, знаючи його параметри та насипну вагу матеріалу, можна обрахувати висоту заповнення резервуара.

Вимірювання рівня за допомогою тільки одного динамометра можливе лише в тому випадку, якщо в резервуарі міститься рідина. На рис. 5.15, *а* схематично показано резервуар 1 з одним динамометром 2 на базі тензоперетворювача. Останній сприймає вагове навантаження від резервуара, яке визначається рівнем його заповнення.

Одну з можливих схем використання тензоперетворювачів для вимірювання рівня рідин із використанням виносного апарата показано на рис. 5.15, *б*. У разі використання резервуарів великих розмірів, наприклад, для зберігання нафтопродуктів на нафтобазах чи нафтопереробних заводах, застосовують схеми з трьома тензодатчиками, розташованими по периметру опори резервуара через 120° (особливо, якщо передбачається зсув центра ваги резервуара, що може трапитися насамперед у випадку із сипкими матеріалами).

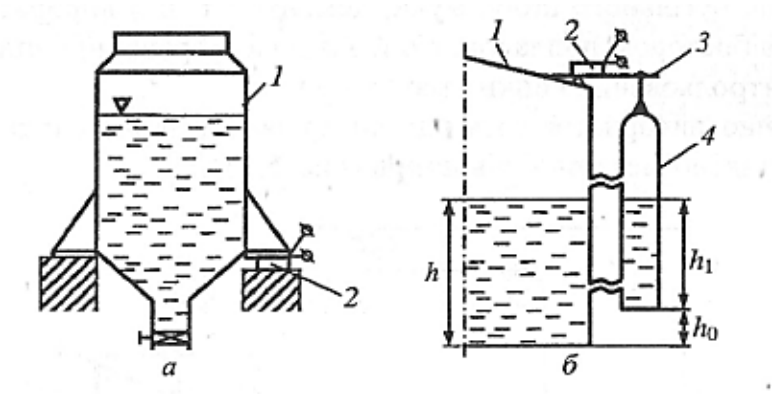


Рис. 5.15. Схема вагових рівнемірів з електричними динамометрами:
1– резервуар; 2 – динамометр; 3 – консольна балка; 4 – виносний апарат

Тензометричний метод вимірювання дозволяє електричним способом виключити вагу резервуара (тару).

Варто звертати увагу на те, щоб вимірюванню була піддана дійсна сила, яку створює резервуар. Практично це означає, що трубопроводи, які служать

для заповнення або спорожнювання резервуара, повинні мати гнучкі вводи, котрі не створюватимуть відчутних пружних зусиль.

Сучасні тензоперетворювачі відзначаються високою надійністю та точністю. Вони майже не потребують технічного догляду, позаяк не містять рухомих деталей. Похибка вимірювання електричного динамометра не перевищує ±0,25 %.

5.10. Вимірювання рівня сипких і кускових матеріалів

Для деяких технологічних процесів нерідко виникає потреба в неперервному вимірюванні рівня сипких матеріалів у бункерах. Для цієї потреби частіше застосовують поплавкові, електричні ємнісні, акустичні, радарні, радіоізотопні, вагові та щупові рівнеміри.

Функціонування поплавкового рівнеміра з поплавком постійного занурення грунтується на підтримувальній здатності сипкого тіла: опущений на відкриту поверхню поплавок рівнеміра не провалюється вглиб сипкого матеріалу. Для вимірювання рівня дрібнодисперсних сипких тіл (наприклад, вугільного пилу, муки, цементу і т. ін.) використовують оснащений вібратором поплавок, який завдяки вібруванню «плаває» на поверхні контрольованих сипких матеріалів.

Успішно використовують для вимірювання рівня сипких матеріалів також контактно-механічні рівнеміри (рис. 5.16).

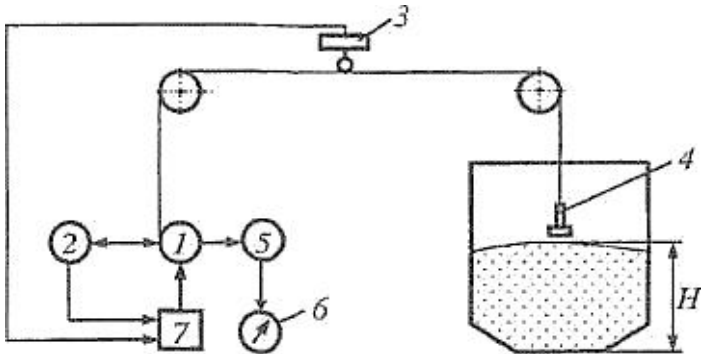


Рис. 5.16. Контактно-механічний рівнемір:
1 – електромеханічна лебідка; 2 – електродвигун; 3 – реле ролика троса; 4 – щуп; 5 – сельсин-датчик; 6 – сельсин-приймач; 7 – блок керування

У них є спеціальні щупи 4, що опускаються електромеханічною лебідкою і на тросі до зіткнення з поверхнею сипкого матеріалу під час циклу вимірювання. Чутливим елементом пристрою служить реле 3 ролика троса, що спрацьовує в разі його ослаблення у той момент, коли щуп 4 лягає на поверхню контрольованого середовища. Установка комутується блоком керування 7, показання передаються дистанційно (наприклад, через сельсинну систему 5). Замість фіксації моменту ослаблення троса в деяких контактно-механічних рівнемірах вимірюють обертальний момент на валу електродвигуна 2, величина якого в момент торкання щупом поверхні сипкого матеріалу різко зменшується.

Контрольні запитання

1. Що називають рівнем?
2. На чому грунтується робота буйкового рівнеміра?
3. Поясніть призначення елементів у схемі буйкового рівнеміра зрівноважувального перетворення?
4. На чому основане пневмометричне вимірювання рівня рідин?
5. Що покладено в основу роботи електричних рівнемірів?
6. На чому грунтується вимірювання рівня ємнісним методом?
7. Поясніть призначення елементів у принциповій схемі електронного блока ємнісного датчика-реле?
8. Для чого призначені кондуктометричні (омічні) сигналізатори рівня?
9. На чому грунтується робота ПВП радарного рівнеміра?
10. Поясніть призначення елементів у схемі акустичного рівнеміра?

РОЗДІЛ 6
ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТА ВИТРАТИ РЕЧОВИНИ

6.1. Загальні відомості

Витратою називають кількість речовини, яка проходить через поперечний переріз потоку (трубопроводу) за одиницю часу. Залежно від одиниці виміру кількості рідини витрати можуть бути об'ємними Q, ($м^3/с$) та масовими G (кг/с). Вони пов'язані між собою залежністю, яка аналогічна залежності між масою та об'ємом рідини, тобто через густину ρ:

$$G = \rho Q. \qquad (6.1)$$

Об'ємні витрати можна визначати через середню швидкість потоку $V_{сер}$ та площу поперечного перерізу потоку F:$Q = V_{сер}F$. Технічні прилади, призначені для вимірювання масових чи об'ємних витрат, називають витратомірами.

За принципом вимірювання витратоміри поділяють на такі основні групи:

1. *Витратоміри змінного перепаду тиску* (витратоміри зі звужувальними пристроями), які перетворюють швидкісний напір потоку контрольованої речовини у перепад тиску.

2. *Витратоміри постійного перепаду тиску* (або витратоміри обтікання – це зокрема ротаметри, поплавкові, поршневі, гідродинамічні витратоміри), які перетворюють швидкісний напір потоку контрольованої речовини у зміщення обтічного тіла.

3. *Тахометричні витратоміри* (турбінні й об'ємні лічильники, кулькові витратоміри), які перетворюють швидкість потоку контрольованої речовини в кутову швидкість обертання обтічного елемента.

4. *Ультразвукові витратоміри,* які побудовані на ефекті захоплення звукових коливань рухомим середовищем.

5. *Електромагнітні (індукційні) витратоміри,* що перетворюють швидкість електропровідної рідини, яка рухається в магнітному полі, в електричний сигнал.

6. *Теплові витратоміри* (калориметричні, термоанемометричні), які побудовані на ефекті перенесення тепла рухомим середовищем від нагрітого тіла.

7. *Витратоміри змінного рівня* (щілинні витратоміри), що ґрунтуються на вимірюванні витрати за гідростатичним тиском стовпа рідини над нижньою кромкою зливного отвору, який має форму щілини певного профілю.

8 . *Вихрові витратоміри,* що використовують залежність частоти пульсацій тиску у вихрових доріжках, які утворюються за гострими гранями розміщеної у потоці контрольованої речовини призми, від швидкості потоку контрольованого середовища.

9. *Інерціальні витратоміри* (турбосилові, коріолісові, гігроскопічні), які ґрунтуються на інерційному впливі маси рідини, що рухається з лінійним чи кутовим прискоренням (вимірюють масову витрату).

10. *Оптичні витратоміри,* що побудовані на захопленні світла рухомим середовищем (ефект Фізо-Фрінелі) чи на розсіюванні світла рухомими частинками (ефект Доплера).

11. *Міткові витратоміри* (із тепловими, іонізаційними, магнітними, концентраційними, турбулентними та іншими мітками), які ґрунтуються на зміні швидкості чи стану мітки під час її проходження через два фіксовані перерізи потоку контрольованої речовини.

12. *Іонізаційні витратоміри,* які грунтуються на вимірюванні того чи іншого залежного від витрати ефекту, що виникає в результаті неперервної чи періодичної іонізації потоку газу або (рідше) рідини.

13. *Ядерно-магнітні витратоміри,* що побудовані на залежності ядерно-магнітного резонансу від витрати потоку речовини.

14. *Концентраційні витратоміри,* які ґрунтуються на залежності кратності розбавлення речовини індикатора, що вводиться в потік, від витрати (суттєва перевага цього методу вимірювання витрати – для його застосування непотрібно знати розміри поперечного перерізу трубопроводу).

15. *Кореляційні витратоміри,* які ґрунтуються на залежності швидкості зміщення максимумів взаємної кореляційної функції двох параметрів потоку одного й того ж роду (густини, електропровідності, температури тощо), змінюваність яких має випадковий характер, у двох перерізах трубопроводу, розташованих на невеликій відстані.

В окрему групу можна виокремити різні витратоміри, використовувані для вимірювання кількості сипких і кускових матеріалів.

Розглянемо особливості конструкції та використання витратомірів, які набули найбільшого поширення у практиці технологічних вимірювань у сільському господарстві.

6.2. Значення засобів вимірювання витрати та загальні вимоги до них

Витратоміри і лічильники кількості (маси й об’єму) рідини, газу та пари в сучасному індустріальному суспільстві винятково значущі. Їх роль дуже зросла у зв’язку з необхідністю максимальної економії енергетичних і водних ресурсів країни, які дедалі більше дорожчають. Без витратомірів не можна забезпечити керування, і, тим паче, оптимізацію технологічних режимів в енергетиці, сільському господарстві, харчовій та в багатьох інших галузях промисловості. Без цих приладів неможлива ні автоматизація виробництва, ні досягнення максимальної її ефективності.

Лічильники кількості потрібні для обліку маси або об’ємів газу, пари, води й інших речовин, які транспортуються у трубах і споживаються окремими об’єктами. Зниження похибки вимірювання витрат і кількості хоча б на 1 % може забезпечити величезний економічний ефект. Останнім часом роль лічильників особливо зростає у зв’язку з комерціалізацією обліку енергоносіїв. Серед численних і різних сучасних вимог до витратомірів та

лічильників, які слід враховувати під час підбирання того чи іншого типу приладу, можна виокремити такі.

Висока точність вимірювання. Це найважливіша вимога, особливо коли треба вимірювати не миттєву витрату, а сумарну кількість (масу або об'єм) речовини. Якщо раніше похибка вимірювання 1,5...2 % вважалася цілком прийнятною, то тепер нерідко потрібно мати похибку не більше 0,2... .0,5 %. Цю вельми малу похибку вже досягнуто за допомогою камерних лічильників рідин (шестеренних, лопатевих, роликово-лопатевих) й інших лічильників. Але такі лічильники не призначені для великих діаметрів труб – тут переважно застосовують витратоміри зі звужувальними пристроями, що забезпечують обмежену точність.

Висока надійність. Ця вимога оцінюється часом, упродовж якого прилад зберігає працездатність і забезпечує потрібну точність. Цей час залежить від типу приладу та умов його експлуатації. Деякі витратоміри, що не мають рухомих частин, можуть надійно працювати дуже довго (так, труби Вентурі, встановлені на водопровідних лініях багатьох міст, справно функціонують десятки років), але витратоміри з рухомими елементами мають значно менший термін служби, який залежить від ступеня чистоти вимірюваної речовини та її змащувальної здатності.

Швидкодія вимірювачів. Вона особливо важлива, коли витратомір застосовують у системах автоматичного регулювання та для вимірювання швидкозмінних витрат. Існує дуже великий розкид швидкодії, яку зазвичай оцінюють значенням сталої часу *T:* від *T,* вимірюваної сотими частками секунди для турбінних чи вихрових витратомірів, до *T,* вимірюваної десятками секунд, як і у випадку теплових витратомірів. Проміжне положення займають витратоміри зі звужувальними пристроями, стала часу *T* яких тим менша, чим коротші сполучувальні трубки, чим менший вимірювальний об'єм дифманометра та чим більший його граничний перепад тисків.

Великий діапазон змінювання (Q_{max} / Q_{min}). Для приладів з лінійною характеристикою він становить 8...20 і більше, а для витратомірів зі звужувальними пристроями, що мають квадратичну характеристику, – лише 3...10. За потреби його можна підвищити до 16, підключаючи до звужувального пристрою два дифманометри з різними Δp_{max}. Величезний і загальний діапазон вимірювання витрат: витрати рідин треба вимірювати від 10 до 10^7... 10^8 кг/год, а газів – від 10^{-4} до 10^5... 10^6 кг/год.

Забезпеченість метрологічною базою. Зразкові витратомірні установки, потрібні для градуювання та перевірки різних витратомірів, – складні й дорогі, особливо в разі великих перевірюваних витрат. Лише витратоміри зі звужувальними пристроями не потребують зразкових витратомірних установок, оскільки для більшості їхніх різновидів експериментально встановлені та унормовані їх коефіцієнти витрат і розширення міжнародним стандартом ISO 5167 та іншими рекомендаціями ISO (ISO – International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації). Це пояснює переважне застосування витратомірів зі звужувальними пристроями.

6.3. Витратоміри змінного перепаду тиску

Для вимірювання витрат у сільському господарстві, харчовій та в багатьох інших галузях промисловості такі витратоміри використовують найчастіше. Це зумовлено властивими їм перевагами: простотою і надійністю; відсутністю рухомих елементів; легкістю серійного виготовлення; низькою вартістю, а також можливостями: використання майже за будь-яких температур і тисків, вимірювання практично будь-яких витрат, застосування для вимірювання витрат різних середовищ (рідин, парів, газів), отримання градуювальної характеристики витратомірів розрахунковим способом (для діаметрів трубопроводів 50 мм і більше) без використання дорогих витратовимірювальних метрологічних установок.

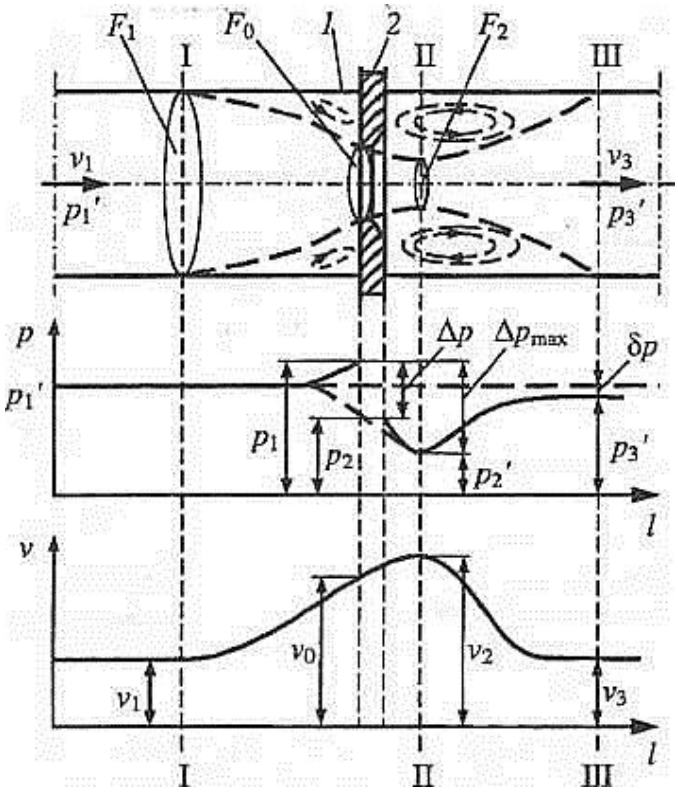


Рис. 6.1. Змінювання тиску *p* та швидкості потоку V під час проходження через діафрагму:

1 – трубопровід; 2 – діафрагма

На рис. 6.1 показано ідеалізовану картину протікання речовини крізь діафрагму (*а*) і епюри тиску (*б*) та швидкості (*в*).

Тиск струменя вздовж осі трубопроводу і тиск біля стінки змінюються майже однаково, за винятком ділянки перед діафрагмою і безпосередньо в ній (пунктирною лінією показано зміну по осі потоку). Тиск біля стінки труби p_1 безпосередньо перед діафрагмою дещо зростає (за рахунок зменшення швидкості в цьому місці).

Якщо швидкість v_3 в ідеальному випадку дорівнює v_1, то тиск p_3' за діафрагмою не досягає колишнього значення p_1' на величину $\delta p = p_1 - p_3'$, яку називають безповоротною втратою тиску. Ця втрата тиску пов'язана з

витратою частки енергії потоку на вихроутворення в «мертвих» зонах (здебільшого за діафрагмою) та на тертя.

Звужувальні пристрої поділяють на стандартні та нестандартні. До стандартних звужувальних пристроїв належать (рис. 6.2, *а, б, в*) стандартні діафрагми – дискові та камерні, стандартні сопла та труби Вентурі. Нестандартні звужувальні пристрої, до яких зокрема належать подвійні діафрагми, діафрагми з подвійним конусом, сегментні діафрагми, сопла у чверть круга, циліндричні сопла тощо, використовують в особливих умовах: у разі малих чисел Рейнольдса, малих діаметрів трубопроводів (менше 50 мм – за таких діаметрів трубопроводів різко зростає вплив шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу на коефіцієнт витрати), сильного забруднення контрольованих рідин тощо.

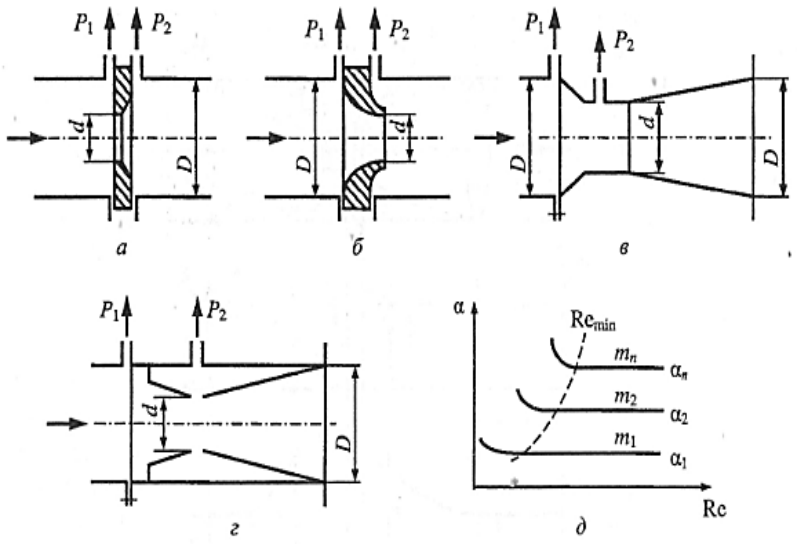


Рис. 6.2. Звужувальні пристрої:

а - стандартна діафрагма; *б* - сопло ISA 1932; *в* - труба Вентурі; *г* - труба Далла; *д* - залежність коефіцієнта витрати α для діафрагм від числа Re і модуля т

а, б, в, г: *D* – діаметр трубопроводу;

d – діаметр отвору звужувального пристрою

Характерна особливість останніх двох різновидів стандартних звужувальних пристроїв, зображених на рис. 6.2, *б, в,* – менші ніж для діафрагми безповоротні втрати тиску за одного й того ж значення модуля *m* звужувального пристрою: якщо на діафрагмі вони досягають 50...70 % від утворюваного на звужувальному пристрої перепаду тиску $\Delta p = p_1 - p_2$, то на соплах – 40...60 %, а на трубах Вентурі – 10...15 %. Подібна тенденція спостерігається й щодо точності вимірювання: якщо похибка вимірювання діафрагм зазвичай перевищує 1,5 %, то для двох останніх звужувальних пристроїв вона становить близько 0,5 %.

Виведемо рівняння вимірювання витрати за допомогою звужувального пристрою для випадку, коли в трубопроводі встановлено діафрагму і по трубопроводу протікає нестислива рідина, густина якої до та після звуження залишається незмінною. Виділимо в трубопроводі три перерізи (див. рис.

6.1): I – перед звужувальним пристроєм, де він на характер потоку ще не впливає, II – у місці найбільшого звуження, що утворюється на деякій відстані за діафрагмою, та III – на такому віддаленні від діафрагми, де параметри потоку знову набувають сталих значень. Через F_1, F_0, F_2 позначимо відповідно площі поперечного перерізу трубопроводу, отвору діафрагми та найбільшого звуження струменя, через v_1, v_0, v_2 – середні швидкості в тих самих перерізах, а через P_1', P_2' – абсолютні тиски рідини у відповідних перерізах.

З умови нерозривності струменя для вибраних перерізів трубопроводу

$$Q_1 = Q_0 = Q_2$$

запишемо

$$F_1 v_1 = F_0 v_0 = F_2 v_2,$$

звідки

$$\mathrm{F_0/F_1 = v_1/v_0 \; і \; F_2/F_0 = v_0/v_2}. \qquad (6.2)$$

Позначимо:

$$F_0/F_1 = m, \text{ а } F_2/F_0 = \mu. \qquad (6.3)$$

Величину $m = (d\ /\ D)^2$ називають модулем або відносною поверхнею звужувального пристрою, а μ – коефіцієнтом звуження потоку.

З урахуванням цих позначень отримаємо з виразів (6.2):

$$v_1/v_0 = m, \text{ звідки } v_1 = m\ v_0; \qquad (6.4)$$

$$v_0/v_2 = \mu, \text{ звідки } v_0 = \mu\ v_2; \qquad (6.5)$$

Підставивши рівняння (6.5) у вираз (6.4), матимемо

$$v_1 = \mu\, m v_2. \qquad (6.6)$$

Для нестисливої рідини за постійної густини та без обміну енергії з навколишнім середовищем з урахуванням утрат і нерівномірності розподілу швидкостей для перерізів I і II горизонтального трубопроводу рівняння Бернуллі, що виражає закон збереження енергії, має вигляд

$$\frac{P_1'}{\rho} + k_1 \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2'}{\rho} + k_2 \frac{v_2^2}{2} + \xi \frac{v_2^2}{2}, \qquad (6.7)$$

де P'_1, P'_2 – абсолютний тиск у відповідних розрізах, Па; ρ – густина рідини, кг/м^3; $\xi v_2^2/\ 2$ – втрати кінетичної енергії на ділянці I – II; ξ – коефіцієнт опору на ділянці I – II; k_1, k_2 – поправкові коефіцієнти на нерівномірність розподілу швидкостей у розрізах I і II. Підставляючи v_1 із виразу (6.6) у рівняння (6.7) та розв'язуючи його відносно v_2, отримаємо

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1' - P_2')}. \qquad (6.8)$$

Для виведення рівняння (6.8) були використані абсолютні тиски P'_1, P'_2 у розрізах I і II, а насправді їх вимірюють безпосередньо біля стінок трубопроводу перед та після звужувального пристрою у вигляді надлиш-

кових тисків p_1, p_2. Для врахування цієї заміни тисків, а також відхилення точок відбору тисків від розрізів I і II, уведемо коефіцієнт відбору

$\psi = (P'_1 - P'_2) / (p_1 - p_2)$, звідки

$$(P_1' - P_2') = \psi(p_1 - p_2). \quad (6.9)$$

З урахуванням рівняння (6.9) вираз (6.8) набуде вигляду

$$v_2 = \frac{\sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}.$$

Оскільки вираз об'ємних витрат для нестисливої рідини має вигляд $Q = v_2 F_2$, то замінивши F_2 відповідно до рівняння (6.3), після перетворення матимемо

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}. \quad (6.10)$$

Комплексний коефіцієнт $\boldsymbol{\alpha}$, який входить до отриманого рівняння вимірювання витрати (6.10), називається *коефіцієнтом витрати* діафрагми:

$$\alpha = \frac{\mu\sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}}. \quad (6.11)$$

Як видно з виразу (6.11), коефіцієнт витрати α враховує розподіл швидкостей у розрізі потоку, зумовлений в'язкістю рідини та тертям її по стінках трубопроводу, вимірювання тиску не в центрі потоку, а біля стінок трубопроводу, заміну абсолютних тисків надлишковими і, нарешті, використання в рівнянні витрати (6.10) площі перерізу діафрагми F_0 замість невизначеної площі перерізу найбільшого звуження потоку F_2 (його місце не визначено – віддаленість найбільшого звуження потоку від діафрагми змінюється зі зміною швидкості потоку).

Стисливість газів і парів під час проходження ними звужувального пристрою враховується введенням коефіцієнта розширення ε: для газів

$\varepsilon < 1$; для рідин $\varepsilon = 1$. З огляду на це рівняння витрати парів і газів в об'ємних та масових одиницях виміру відповідно матимуть вигляд:

$$Q = \alpha\varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}; \quad (6.12)$$

$$G = \alpha\varepsilon F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}; \quad (6.13)$$

Коефіцієнт *a* залежить від багатьох чинників: від числа Рейнольдса *Re*, шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу, співвідношення діаметрів *d* і *D*, тобто від модуля *m,* а також від властивостей контрольованої речовини, а для діафрагм – ще й від гостроти її кромки (тільки в отворі з гострою кромкою, який, з погляду гідравлічного опору, прирівнюється до отвору в тонкій стінці, товщина стінки не впливає на форму струменя, тому коефіцієнт опору ξ, є величиною сталою). Вплив шорсткості трубопроводу та затуплення гострої кромки (для діафрагм) враховують множенням початкового значення коефіцієнта витрати $\alpha_{\text{п}}$ на відносні поправкові кое-

фіцієнти $k_ш$ та $k_п$ відповідно. Інваріантність коефіцієнта витрати α щодо числа *Re* досягається через забезпечення такого гідродинамічного режиму потоку контрольованої речовини, коли його число *Re* перевищувало б мінімальне (граничне) число Re_{min} (рис. 6.2, *г*).

У міжнародному стандарті ISO 5167 коефіцієнт витрати для всіх звужувальних пристроїв подано у вигляді двох множників:

$$a = EC,$$

де $E = 1/\sqrt{1-\beta^4}$ – коефіцієнт швидкості входу; $\beta = d / D$ – відносний діаметр звужувального пристрою; *C* – коефіцієнт витікання. Причому завжди $E \geq 1, C \leq 1$.

Міждержавний стандарт ГОСТ 8.563–97 подає універсальні формули (6.12) і (6.13) для обчислення об'ємної та масової витрат у такому вигляді:

$$Q = CE\varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}};$$

$$Q = CE\varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho\Delta p}.$$

Значення коефіцієнта витікання *C* для сопел ISA 1932, сопел і труб Вентурі становить 0,9.. .0,995, а для діафрагм С ≈ 0,6. Це пояснюється тим, що для всіх звужувальних пристроїв коефіцієнт *C* враховує втрату енергії в самому пристрої, нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу та розміщення точок відбору тисків, тобто у формулі (6.11) ці чинники враховують коефіцієнти ξ, k_1, k_2, та ψ, для діафрагми коефіцієнт С враховує ще й коефіцієнт звуження потоку μ = 0,6...0,69. Загалом визначити теоретично з достатньою точністю конкретні значення коефіцієнта витрати α за формулою (6.11) неможливо (з більшою точністю значення коефіцієнтів *C* та α визначають експериментально), однак значущість формули (6.11) полягає в тому, що її аналіз дозволяє виявити вплив на коефіцієнт витрати α всіх величин, які в неї входять.

Вибираючи найбільш доцільний тип звужувального пристрою, слід враховувати особливості застосування окремих типів цих пристроїв.

Стандартні діафрагми. Завдяки простоті та дешевизні виготовлення стандартні діафрагми залишаються основним типом звужувальних пристроїв для середніх і великих *D,* аж до *D* = 1000 мм. А для чисел Re > 10^7 вони зі стандартних звужувальних пристроїв єдино припустимі, так само, як і для вимірювання витрати вологої насиченої пари. Але їх не слід застосовувати в разі малих *D,* позаяк для *d*<125 мм у результаті вимірювання з'являється похибка від затуплення вхідної кромки діафрагм. Взагалі діафрагми варто застосовувати тоді, коли похибкою від затуплення можна знехтувати впродовж усього міжвивірювального періоду.

Крім того, діафрагми, особливо із фланцевим відбором тисків, зі зростанням відносного діаметра звужувального пристрою β сильно обмежують можливість вимірювання витрати в потоках з малими числами Re.

Сопла ISA 1932. В інтервалі значень D від 50 до 300...400 мм ці сопла можуть забезпечити більшу точність вимірювання, ніж діафрагми, через, меншу похибку від шорсткості трубопроводу та відсутність похибки від затуплення вхідної кромки, а для газу та пари – ще й завдяки меншій похибці коефіцієнта розширення δ_ε. У паропроводах високого тиску, у які звужувальні пристрої вварюються, якщо D < 500 мм, завжди застосовують сопла.

Труби Вентурі. З усіх звужувальних пристроїв труби Вентурі єдино застосовні до D = 1200 мм згідно з ISO 5167. У межах чисел Re від $2 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^6$ труби Вентурі варто рекомендувати для широкого застосування, особливо для вимірювання витрат рідини. Втрата тиску із застосуванням труб Вентурі істотно менша порівняно з іншими звужувальними пристроями, особливо для малих β, за яких втрата тиску в стандартних діафрагмах і соплах, а також у соплах Вентурі різко зростає. Крім малої втрати тиску, вони потребують у багато разів менших, ніж інші пристрої, довжин прямих ділянок трубопроводу перед та після звужувального пристрою, і мають малу похибку коефіцієнта витікання С (δ_c = 0,7 %). Але для вимірювання витрати газу та пари застосування труб Вентурі доцільне лише в разі обмежених швидкостей (менших за 10...20 м/с) і відповідно малих значень $\Delta p_{гр}/p_1$ і β<0,4...0,45, щоб уникнути виникнення великої похибки від δ_ε.

Виготовлюють також сопла Вентурі, однак їх застосування дуже обмежене. У разі потреби мати малу втрату тиску краще застосовувати труби Вентурі (менші прямі ділянки, краща точність, простіші у виготовленні), а у всіх інших випадках сопла Вентурі поступаються соплам ISA1932.

Різновидом труби Вентурі є *труба Далла* (рис. 6.2, *г),* яка забезпечує більш високий перепад тиску (більше ніж у два рази) та менші втрати тиску (близько 4...6 % від Δp). Вона коротша за трубу Вентурі, тому застосовується там, де для встановлення труби Вентурі бракує місця.

Зносостійкі діафрагми. Вони доцільні для застосування замість стандартних діафрагм, якщо d < 125 мм, але по можливості для значень β < 0,6, у межах яких похибка вихідного значення δ_c = 0,4 %, а додаткова похибка від шорсткості трубопроводу мала.

Приклад будови системи для вимірювання витрат у трубопроводі за допомогою звужувального пристрою показано на рис. 6.3. Первинним вимірювальним перетворювачем є нормальна труба Вентурі 1, а перепад тиску вимірюється мембранним дифманометром 5.

Для вимірювання витрати рідини дифманометр слід установлювати нижче від звужувального пристрою (щоб уникнути впливу газових бульбашок на результат вимірювання). Для вимірювання витрати газу дифманометр, навпаки, треба розміщувати над звужувальним пристроєм, щоб уникнути похибок від випадкового потрапляння рідини в прилад. Для налагодження витратоміра використовують вентилі: зрівняльний 4 та запірні 2 і 3.

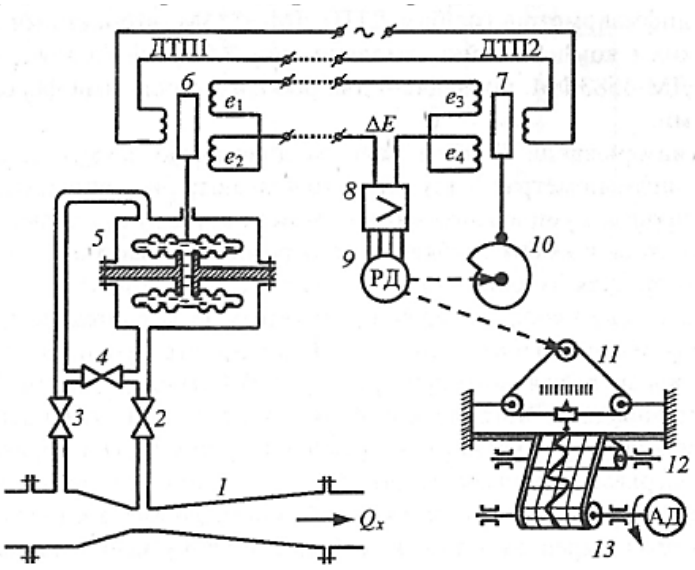


Рис. 6.3. Схема вимірювання витрати та дистанційного передавання вимірювальної інформації:

1 – труба Вентурі; 2,3 – запірні вентилі; 4 – зрівняльний вентиль; 5 – дифманометр мембранний; 6, 7 – плунжери; 8 – підсилювач; 9 – реверсивний електродвигун; 10 – ексцентрик; 11 – привід покажчика та пера самописа; 12 – реєструвальний пристрій; 13 – привід діаграмної стрічки (АД – асинхронний двигун)

У початковому положенні всі три вентилі закриті. Спочатку – для запобігання пошкодженню мембран тиском контрольованої речовини в трубопроводі – відкривають зрівняльний вентиль, потім відкривають обидва запірні. Після цього закривають зрівняльний вентиль і починають вимірювання. Передавання вимірювальної інформації на потрібну відстань здійснює система, що складається з двох ДТП (ДТП1 і ДТП2) з рухомими плунжерами 6 і 7, підсилювача 8, реверсивного електродвигуна 9, ексцентрика (реалізує квадратичну залежність між витратою та перепадом тиску на звужувальному пристрої) 10 і реєструвального пристрою 12 з рулонним діаграмним папером для реєстрації результатів вимірювання.

Диференціально-трансформаторна система передавання складніша за індуктивну, однак її велика перевага в тому, що тертя у вторинному приладі не впливає на показання, бо РД завжди його подолає. Крім мембранних дифманометрів (на базі ДТП) ДМ-3583М, вторинними приладами для яких є компенсаційні самописи типу КСД, виготовляють дифманометри ДМ-3583ФМ, призначені для роботи з приладами феродинамічної системи.

Для вимірювання витрати пари за допомогою звужувального пристрою та дифманометра з'єднувальні трубки потрібно заповнити конденсатом. У процесі вимірювання витрати може порушитися однаковість конденсатних стовпів в обох трубках через переміщення частини конденсату в дифманометр. Для запобігання цьому застосовують зрівняльні посудини, що мають велику площу поперечного перерізу. їх установлюють безпосередньо біля звужувального пристрою. Дифманометр бажано розташовувати нижче від звужувального пристрою (рис. 6.4, *а*), Щоб повітря, яке виділилося або випадково потрапило в трубки, могло потрапляти в паропровід.

Дія зрівняльних посудин тим ефективніша, чим більша горизонтальна площа $f_п$ дзеркала рідини в посудині та чим менший вимірювальний об'єм $V_в$

дифманометра, тобто той об'єм, який переміщується з одного коліна в друге при зміні перепаду від нуля до Δp_{max}. Похибку вимірювання витрати δ_Q (%), яка виникає у момент вимірювання перепаду від Δp_1 до Δp_2, визначають за формулою

$$\delta_Q = 50\frac{V_B(\rho_р - \rho_п)g(\Delta p_1 - \Delta p_2)}{f_п \Delta p_{max} \Delta p_2},$$

де $\rho_р$ і $\rho_п$ – густина рідини та пари в зрівняльній посудині відповідно.

Ця формула дозволяє визначити площу горизонтального поперечного перерізу посудини $f_п$ для заданої похибки δ_Q виходячи з вимірювального об'єму $V_в$ та граничного перепаду Δp_{max} дифманометра: чим більший $V_в$ і чим менший Δp_{max}, тим більшою має бути площа $f_п$ Для дифманометрів компенсаційного типу, що мають дуже малу величину $V_в$, зрівняльні посудини можна замінювати короткими ізольованими горизонтальними трубками.

Якщо дифманометр установлено вище від звужувального пристрою, то на самому верху мають бути газозбірники (рис. 6.4, *б*). У горизонтальному трубопроводі тиски p_1 і p_2 (перед та після звужувального пристрою відповідно) відбирають на рівні горизонтального діаметра. У вертикальному чи нахиленому паропроводі трубку, що йде від нижнього відбірного отвору, теплоізолюють, піднімають до рівня верхнього отвору і в одній площині вводять обидві трубки в зрівняльні посудини. Останні бувають зі стоком і без стоку конденсату в паропровід.

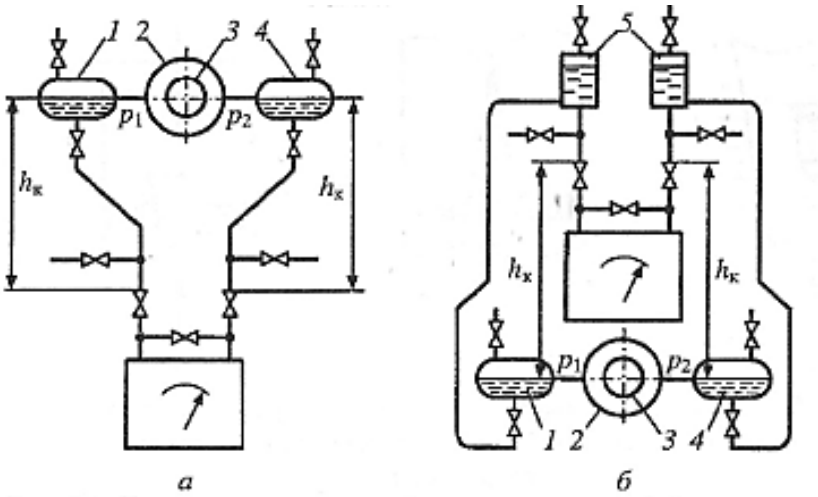


Рис. 6.4. Схема розташування зрівняльних посудин і з'єднувальних трубок для вимірювання витрати пари дифманометрами, розташованим нижче (*а*) та вище (*б*) від звужувального пристрою:

1,4 – зрівняльні посудини; 2 – трубопровід; 3 – звужувальний пристрій; 5 – газозбірники

За дуже високої температури пари для запобігання потраплянню холодної рідини з трубок у звужувальний пристрій стандарт ISO/TC–30 рекомендує безпосередньо перед звужувальним пристроєм розміщувати пастку типу кишені, об'єм якої приблизно дорівнює об'ємові зрівняльної посудини.

6.4. Витратоміри постійного перепаду тиску

У цих витратомірах, які ще називають витратомірами обтікання, обтічне тіло (поплавок, поршень, клапан, диск тощо) сприймає з боку потоку контрольованої рідини силову дію (гідродинамічний тиск), яка змінюється зі зміною витрати. Це спричиняє переміщення обтічного тіла вверх або вниз доти, доки його вага не буде зрівноважена протидійними силами.

6.4.1. Ротаметри

Найпоширеніші серед витратомірів постійного перепаду – ротаметри (рис. 6.5), яким властиві конструктивна простота (зокрема, з дистанційним передаванням сигналу), висока чутливість і, як наслідок, можливість вимірювання малих витрат та застосування для вимірювання витрат агресивних середовищ, сталість відносної похибки, незначні втрати тиску.

У разі зміщення поплавка через конусність трубки змінюється площа прохідного перерізу (кільцевого зазору) між поплавком ротаметра та внутрішньою стінкою конічної трубки. Це змінює перепад тиску по обидва боки поплавка, а отже, й піднімальну силу, що діє на поплавок.

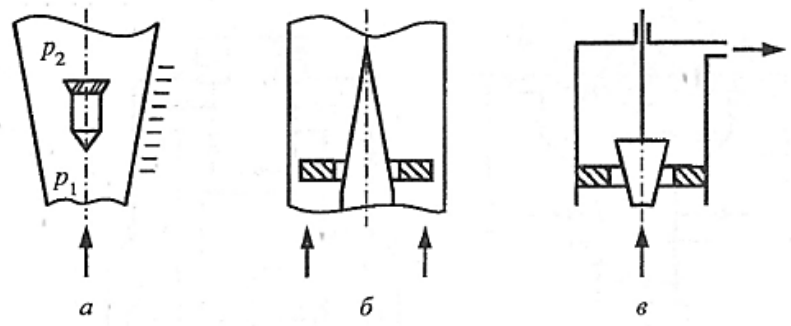


Рис. 6.5. Схеми перетворювальних елементів витратомірів обтікання:
а – ротаметрів з конічною трубкою; *б* – конічною вставкою; *в* – поплавкових витратомірів;

Для запобігання можливому тертю поплавка зі стінкою трубки в його верхньому ободі зроблено під кутом прорізи, які змушують поплавок обертатись і самоцентруватись у потоці контрольованої речовини.

Розглянемо сили, що діють на поплавок (рис. 6.5, *а*). Зверху вниз на поплавок діє сила G тяжіння поплавка в контрольованій речовині:

$$G = gV(\rho_п - \rho_р)$$

де V – об'єм поплавка; $\rho_п$, $\rho_р$ – густини матеріалу поплавка (суцільного) та контрольованої речовини відповідно.

Знизу вверх на поплавок діють три сили: 1) різниця статичних тисків перед поплавком p_1 і після нього p_2, яка формує піднімальну силу $N = (p_2 - p_1)S$, де S – площа найбільшого поперечного перерізу поплавка; 2) динамічний тиск W потоку, що визначається за формулою $W = c\rho_р v^2 S/2$, де c – коефіцієнт опору поплавка, залежний від його форми; v – характерна швидкість потоку (середня швидкість перед поплавком); 3) сила тертя

$F_т = k v_к^n S_б$, де k – коефіцієнт опору поплавка, що залежить від числа Re та шорсткості бокової поверхні поплавка; $v_к$ – середня швидкість потоку в кільцевому каналі; n – показник, що залежить від швидкості (зазвичай $n = 2$); $S_б$ – площа бокової поверхні поплавка.

Якщо знехтувати силами W і $F_т$, то з рівняння рівноваги цих сил отримаємо

$$(p_1 - p_2) = G/S. \qquad (6.14)$$

Оскільки праву частину рівняння (6.14) становлять сталі величини, то $p_1 - p_2 = \text{const}$. Це й стало підставою вважати ротаметри витратомірами постійного перепаду тиску. Однак ця сталість тільки приблизна, позаяк зі збільшенням витрати зростають як динамічний тиск W, так і сила тертя $F_т$. Таким чином, зі збільшенням витрати перепад тиску $p_1 - p_2$ на поплавку має зменшуватися, хоча, як свідчить досвід, загальний перепад на ротаметрі з урахуванням втрат на приєднувальних штуцерах при цьому зростає.

У стані рівноваги означених сил поплавок «зависає» у потоці на певній висоті, якій відповідає певна площа поперечного перерізу кільцевого каналу (остання визначає опір, який чинить поплавок потокові, а отже, й відповідну витрату енергії на подолання цього опору, тобто перепад тиску). Зі зміною витрати контрольованої речовини відповідно змінюється піднімальна сила поплавка $(p_1 - p_2)S$ і рівновага сил порушується. Залежно від співвідношення сил поплавок зміщуватиметься вверх або вниз (при цьому відповідно змінюватиметься площа кільцевого зазору, а отже, й перепад тиску на поплавку), відшукуючи місце, де перепад тиску дорівнюватиме G/S. Тільки-но перепад тиску досягне значення, за якого піднімальна сила знову дорівнюватиме силі тяжіння поплавка в контрольованій речовині, поплавок зупиниться на відповідній відмітці шкали.

Використовуючи ті ж підходи, що й для виведення рівняння вимірювання витрати для звужувальних пристроїв, отримаємо рівняння витрати для ротаметра:

$$Q = \alpha S_к \sqrt{\frac{2gV(\rho_п - \rho_р)}{\rho_р S}},$$

де $S_к$ – площа кільцевого зазору між конусною трубкою і поплавком у місці його найбільшого поперечного перерізу.

Коефіцієнт витрати α залежить від багатьох змінних, які зазвичай не можна визначити аналітично. Тому ротаметри градуюють експериментально, використовуючи як градуювальну речовину воду чи повітря. Показання для вимірювання інших речовин розраховують за формулою

$$Q_1 = Q_0 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_п - \rho_1}{\rho_п - \rho_0}},$$

де Q_0 – витрата під час стандартного градуювання; α_0 і α_1 – відповідні коефіцієнти витрат для стандартного і нового градуювання; ρ_0 і ρ_1 – густина

стандартної (градуювальної) та нової (вимірюваної) речовин відповідно.

Трубка ротаметра може бути і не конічною. Тоді для забезпечення описаного принципу дії можна використовувати конічне тіло (рис. 6.5, *б*), розміщене аксіально всередині циліндричної трубки, чи конічний клапан (рис. 6.5, *в*) у циліндричному сідлі.

У ротаметрах зі скляними трубками (застосовують для тиску до 0,6 МПа), які використовуються для вимірювання витрат прозорих рідин або газів, поділки шкали наносять безпосередньо на трубку.

Витратоміри, які використовуються в молочній промисловості

Ротаметричний (поплавковий) витратомір (рис. 6.6) має конічну вертикальну трубку 1, в нижній частині якої знаходиться металевий поплавок, що щільно прилягає в неробочому положенні до внутрішніх стінок трубки 1. При переміщенні молока від низу до верху поплавок 2 ться, між ним і стінками трубки утворюється зазор. Чим сильніше потік, тим більше проходить молока. Кількість молока, що проходить через зазор, фіксується на шкалі 3. Ротаметричний витратомір використовується при визначенні кількості вершків, що виходять із сепаратора.

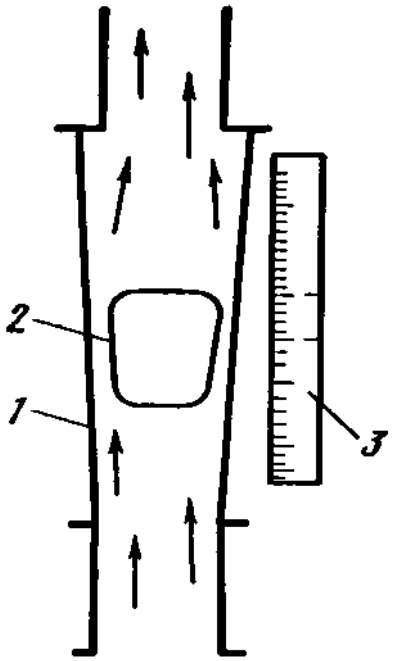


Рис. 6.6. Автоматичний поплавковий (ротаметричний) лічильник:
1 – вертикальна конічна трубка; 2 – поплавок; 3 – шкала

6.4.2. Поплавкові витратоміри

Принцип дії цих витратомірів такий самий, як і ротаметрів. Від ротаметрів вони відрізняються лише конструктивно: у них немає скляної конічної трубки, хід поплавка невеликий (не більше 40...70 мм) та й зовнішня форма поплавка інша (рис. 6.5, *в*).

Для вимірювання витрат у технологічних потоках у системах автоматичного керування застосовують поплавкові витратоміри, споряджені перетворювальними пристроями з електричним чи пневматичним вихідними сигналами (рис. 6.7).

Переміщення поплавка пневматичного перетворювача (рис. 6.7, *б*) спричиняє переміщення внутрішнього магніту 1, що, у свою чергу, переміщує зовнішній магніт 2, який є заслінкою, відносно сопла 3. Наприклад, зі збільшенням витрати клапан 5 піднімається вгору та переміщує із собою магніт 1. У тому ж напрямі буде переміщуватись і магніт 2. При цьому, обертаючись навколо осі, заслінка наблизиться до сопла 3, зменшуючи викид $p_{жив}$ через сопло в атмосферу, – $p_{вих}$ зростає (пропорційно витраті). Вихідний сигнал стискає сильфон зворотного зв'язку 4, який переміщує вгору сопло 3, завдяки чому заслінка 2, повертаючись, дещо відходить від сопла – настає новий стан рівноваги, який відповідає новому значенню вимірюваної витрати.

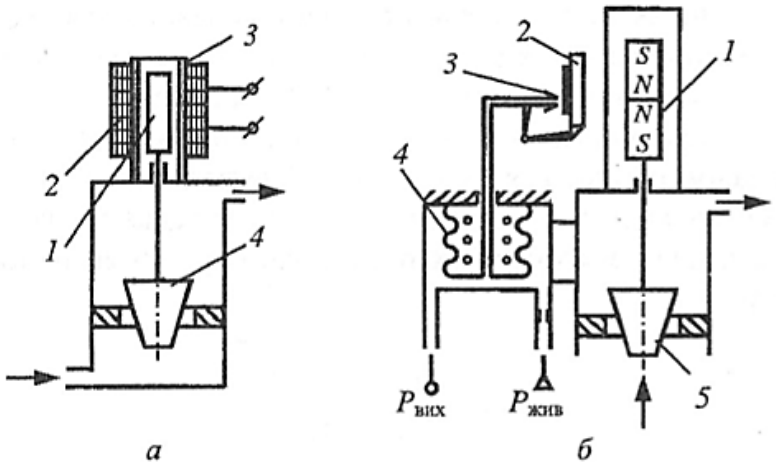


Рис. 6.7: Схема витратомірів обтікання з електричним (а) та пневматичним (б) перетворювачами сигналів:

а: 1 – плунжер; 2 – котушка; 3 – трубка із немагнітного матеріалу; 4 – поплавок;
б: 1 – внутрішній магніт; 2 – зовнішній магніт; 3 – сопло; 4 – сильфон зворотного зв’язку; 5 – поплавок

Вади, що обмежують використання цих витратомірів: вони потребують переградуйовування для кожної нової вимірюваної речовини, непридатні для вимірювання великих витрат, не існує наукових принципів їх взаємозамінності та розрахункового градуювання.

6.5. Тахометричні витратоміри

Це найбільш точні засоби для вимірювання витрати (серійно випускаються витратоміри з класами точності 0,25 – 0,5, однак відомі турбовитратоміри класу 0,1 – 0,2). За принципом дії тахометричні витратоміри поділяють на швидкісні (турбінні), кулькові, роторно-кульові та камерні (об'ємні) лічильники.

6.5.1. Камерні лічильники

Камерні лічильники відраховують кількість речовини, що проходить крізь них, окремими, однаковими за об'ємом дозами, які потім підсумовуються. Дія цих лічильників ґрунтується на витискуванні певних

об'ємів контрольованої речовини з вимірювальної камери лічильника обертовими тілами спеціальних профілів, поверхні яких взаємно обкочують одна одну. Для вимірювання кількості рідини використовують лічильники з овальними шестернями (рис. 6.8, а), а для вимірювання кількості газів із роторами лемніскатної форми (рис. 6.8, *б*).

Для зменшення тертя між торцевими поверхнями шестерен і стінками вимірювальної камери шестерні встановлюють на горизонтальних осях.

Овальні шестерні обертаються не зовсім рівномірно, тому залежність об'єму витісненої речовини від кута повороту шестерень нелінійна. Для усування нелінійності застосовують компенсувальний привід.

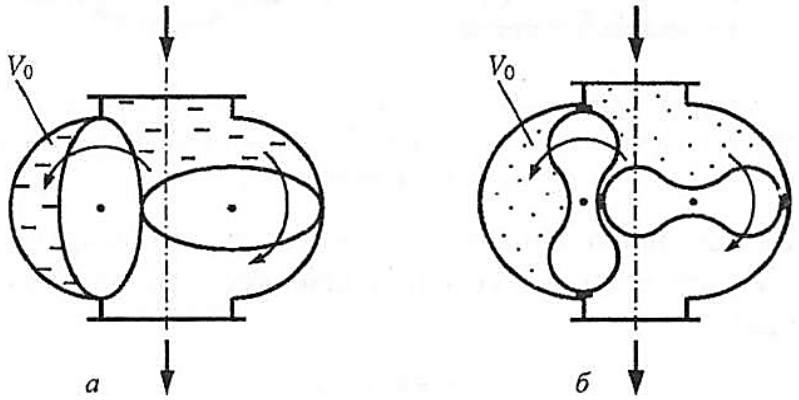


Рис. 6.8. Схеми об'ємних лічильників для рідин (*а*) та газів (*б*)

Лічильники і витратоміри для визначення об'єма молока і рідких молочних продуктів.

Для отримання інформації про об'єм молока і рідких молочних продуктів, що протікають по трубопроводу, застосовують технічні вимірювальні прилади двох видів: *лічильники і витратоміри*. Лічильники служать для вимірювання сумарного об'єму продукту за певний проміжок часу в кубічних метрах або літрах за годину. Витратоміри – для вимірювання об'ємної витрати в кубічних метрах або літрах за годину. Витратоміри, оснащені блоками інтеграції, можна застосовувати замість лічильників.

Лічильники використовують для контролю кількості молока при прийманні, для міжцехового контролю і в інших випадках, витратоміри – в основному при нормалізації і заквасці молока, для дозування закваски, а також в процесі згущування молока.

На основі лічильників і витратомірів випускають комплексні стаціонарні та пересувні установки для вимірювання кількості молока і рідких молочних продуктів в потоці, зокрема, при прийманні на молокопереробних підприємствах.

Лічильник, що має проточну вимірювальну камеру, містить робочий елемент, що обертається, який ділить рухому рідину на порції певної величини. Суми цих порцій, що витісняються із вимірювальної камери за

певний проміжок часу, дорівнюють об'єму вимірюваної рідини і пропорційні частоті обертання робочого елементу.

Частота обертання визначається рахунковим пристроєм, який зв’язаний з обертовим елементом за допомогою передавального механізму. В залежності від виду обертового елемента, розрізняють лічильники з кільцевим поршнем і з овальними шестернями. Порції рідини витісняються обертовими елементами з вимірювальної камери під дією різниці тисків.

Об'ємний лічильник з овальними шестернями (рис. 6.9, *а*) складається з вимірювальної камери, в яку поміщені дві овальні шестерні 2 з дрібними зубами. Молоко в лічильник подається під тиском, тому на стороні надходження молока тиск завжди більший, чим на виході. Кожна шестерня при повороті (рис. 6.9, *б*) переміщає частину молока, обмежену стінками камери і зубчастою поверхнею шестерні, з боку надходження на сторону виходу. На рис. 6.9, *в* положенні шестерень I ця частина молока відмічена подвійним штрихуванням.

За рахунок різниці тиску шестерні обертаються. Ведучою шестернею в положенні I є верхня, в положенні II обидві шестерні обертаються під дією тиску рідини, в положенні III – ведуча шестерня нижня і так далі. Торцеві сторони шестерень повинні щільно підходити до дна і кришки вимірювальної камери. Зуби шестерень мають перебувати постійно в щільному зачепленні і, при відсіканні порції молока, щільно прилягати до стінок камери. Це запобігає перетіканню молока з боку входу на сторону виходу і забезпечує точність показів. Перепад тисків має бути мінімальним (не перевищувати 0,05 МПа), оскільки кількість молока, що перетікає через негерметичність пропорційна перепаду тисків.

Вимірювальна камера лічильника з шестернями герметично відділена від рахункового механізму кришкою 3, через яку передається обертання нижньої шестерні на привідний вал рахункового механізму. Це обертання передається за допомогою двох магнітів, один з яких вмонтований в торцевій стороні шестерні рахункової камери, інший – на провідній шестерні 4 рахункового механізму. Рахунковий механізм за допомогою системи шестерінчастої і гвинтової передачі точно перетворює частоту обертання шестерень вимірювальної камери в покази кількості молока.

Лічильники такої конструкції виготовляють декількох типорозмірів. Кожен з них розрахований на визначений тиск, температуру і об'єми продукту. Для видалення повітря з молока, перед лічильником встановлюють повітроохолоджувачі.

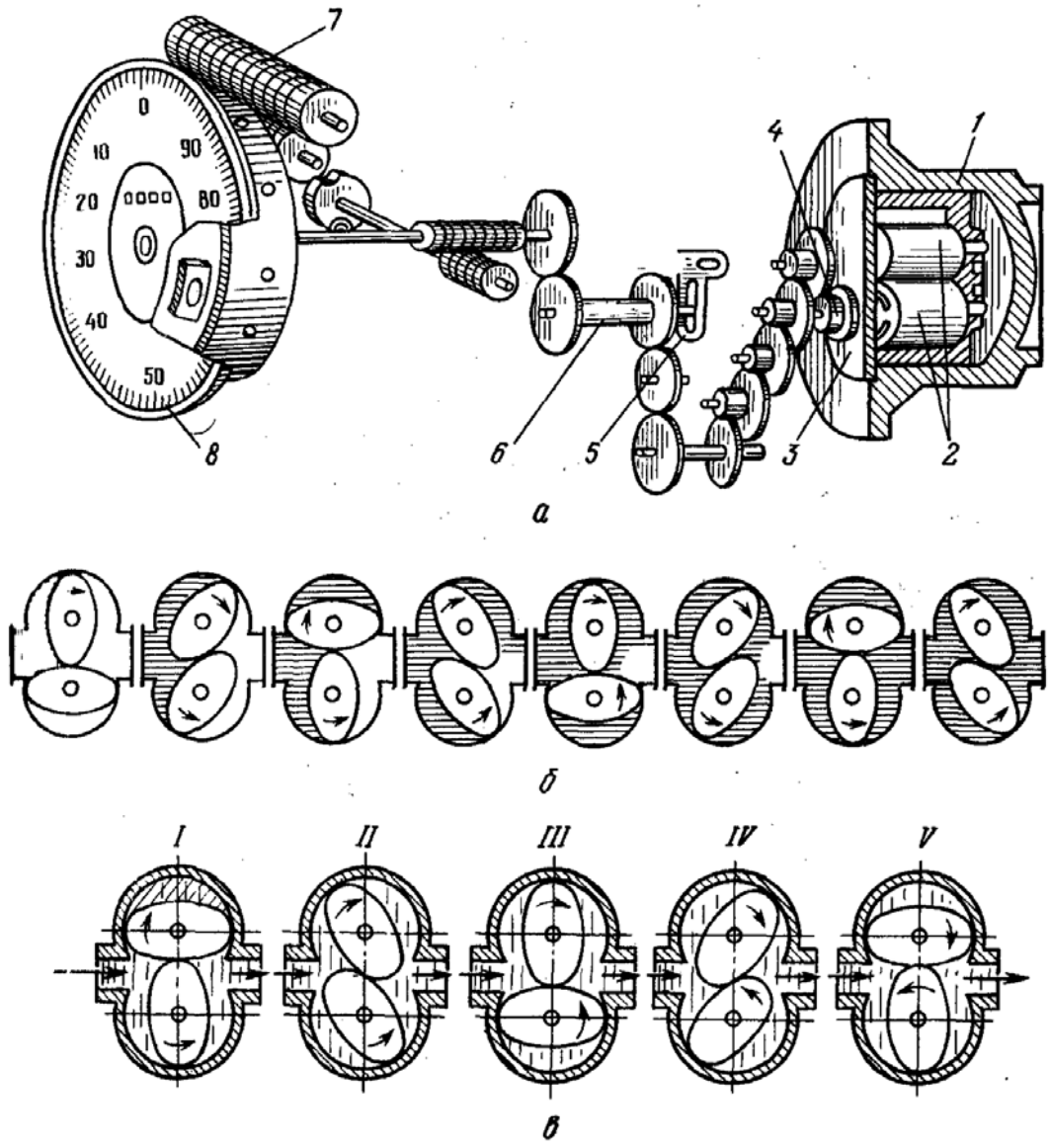


Рис. 6.9. Схема лічильника-витратоміра:
1 – вимірювальна камера; 2 – овальні шестерні; 3 – кришка вимірювальної камери; 4 – ведуча шестерня з магнітом; 5, 6, 7 – система передач; 8 – показуючий блок

Схема дії ***лічильника з кільцевим поршнем*** приведена на рис. 6.10. Вимірювальна камера 3 обмежена двома концентричними циліндрами і розділена перегородкою 8. З обох боків камери розташовані вхідні 12 і вихідні 13 отвори. Вхід від виходу ізольований з одного боку перегородкою, з іншого – щільноприлягаючим рухомим кільцевим поршнем 4. Останній є циліндричним кільцем, прорізь якого ковзає по перегородці. В середині поршня розташована провідна цапфа, рухома в кільцевому просторі.

У положенні I рідина поступає через вхідний отвір, заповнюючи кільцевий поршень і повертаючи його в положення II. У положенні II вимірювальний об'єм V_1, що знаходиться в середині поршня, ізольований від вихідного та вхідного отворів. Під тиском, створюваним продуктом, поршень

переходить в положення III, і виміряний об'єм продукту виливається у вихідний отвір. Коли кільцевий поршень 4 переміститься в положення IV, об'єм буде повністю від'єднаний від вхідного і вихідного отворів.

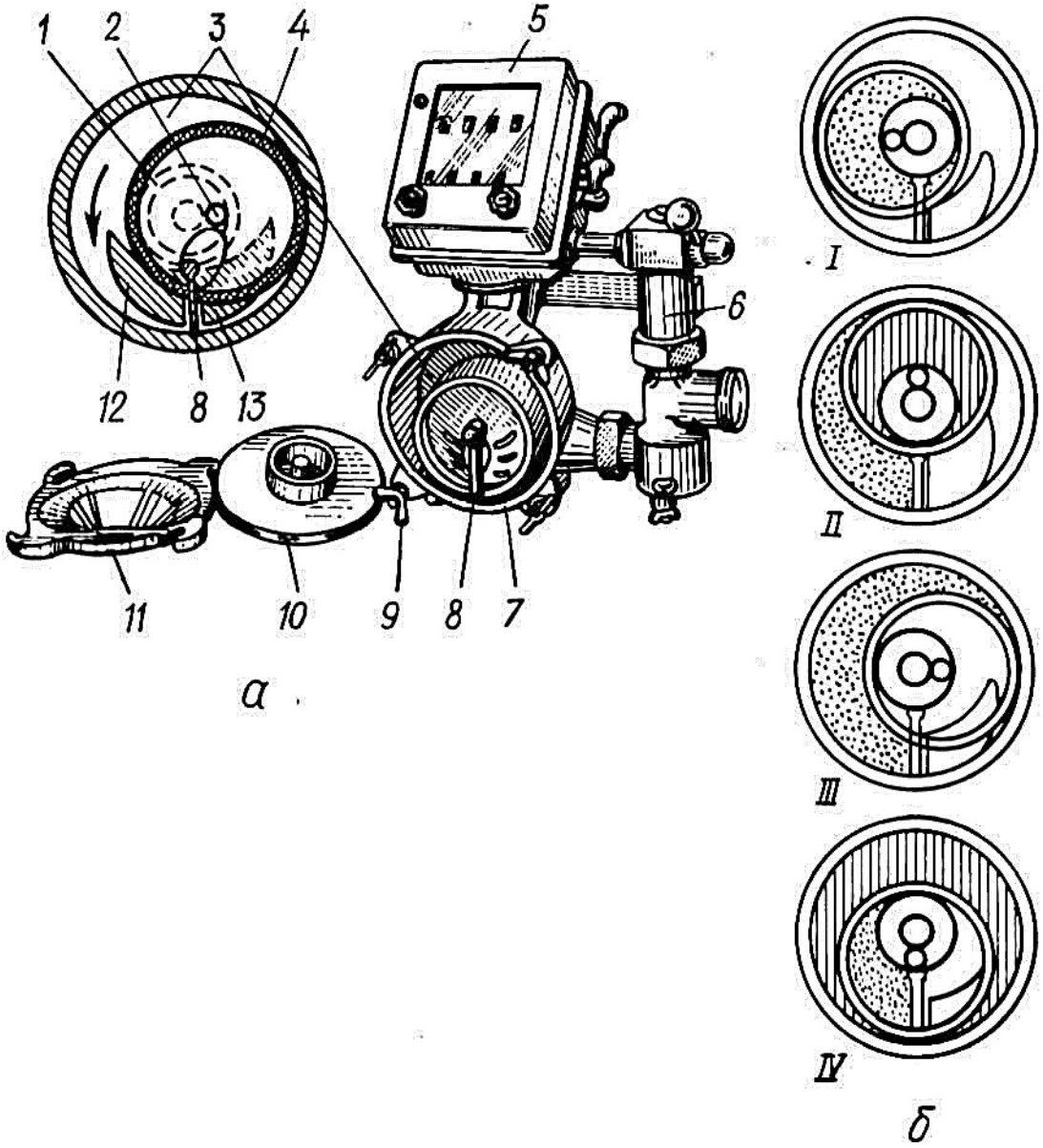


Рис. 6.10. Лічильник з кільцевим поршнем:

а – будова: 1 – кільцевий простір; 2 – цапфа; 3 – вимірювальна камера; 4 – кільцевий поршень; 5 – рахунковий механізм; 6 – клапан; 7 – корпус лічильника; 8 – перегородка; 9 – затискна гайка; 10 – диск; 11 – кришка; 12 – вхідний отвір; 13 – вихідний отвір; б – схема роботи лічильника: I, II, III, IV – основні положення кільцевого поршня

У наступний момент почнеться заповнення об'єму V_1 через вхідний отвір, а спорожнення відміряного об'єму V_2 – через вихідний отвір. Потім кільцевий поршень перейде в положення II і цикл повториться. Обертання кільцевого поршня передається рахунковому механізму за допомогою магнітної муфти, що має наступну будову.

Один з постійних магнітів (напівмуфта) запресований в диск, який обертається з цапфою усередині мірної камери. Іншою постійний магніт

(теж напівмуфта) встановлений зовні мірної камери і жорстко зв'язаний з валом рахункового механізму, що показує загальну кількість продукту.

Серійно випускаються лічильники таких калібрів (діаметр умовного проходу вхідного патрубка – в міліметрах): 15, 20, 25, 30, 32, 40, 50, 60, 80, 100, 125, 150, 200, 250 мм із границями вимірювання 0,01...250 $м^3$/год. Для правильного вибору об'ємного рідинного лічильника необхідно знати також характеристики вимірюваної рідини (в'язкість, схильність до кристалоутворення, тиск, температуру).

До об'ємних лічильників належать також лопатеві.

Серед особливостей використання об'ємних лічильників слід назвати потребу в якісній фільтрації вимірюваного середовища від домішок, а також високий рівень акустичного шуму, який спричиняють обертові елементи.

6.5.2. Турбінні (швидкісні) лічильники

Швидкісні витратоміри мають обертові ЧЕ у вигляді аксіальних або тангенціальних турбінок (останні іноді називають крильчатками), які приводяться в обертання потоком речовини, що протікає через них. Лопаті аксіальних турбінок розміщені на гвинтовій лінії, а вісь обертання збігається з віссю потоку (рис. 6.11, *а*); вісь обертання тангенціальних турбінок перпендикулярна до напряму потоку, а прямі лопаті розташовані радіально відносно осі (рис. 6.11, *б*).

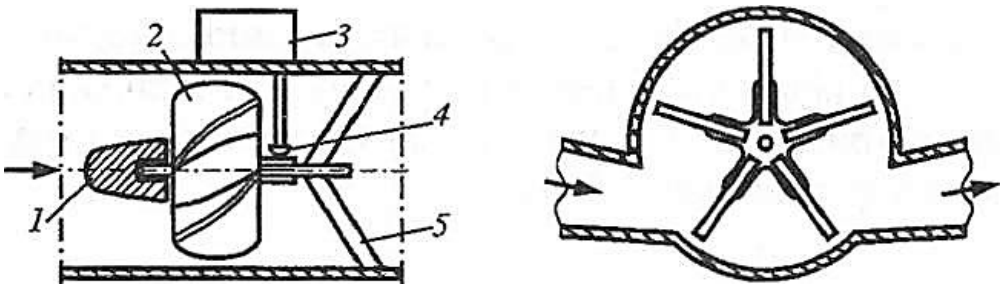


Рис. 6.11. Швидкісні лічильники з аксіальною (*а*) і тангенціальною (*б*) турбінками:
1 – струмененапрямляч; 2 – турбінка; 3 – механічний лічильний пристрій; 4 – передавальний механізм; 5 – опори

Принцип дії швидкісних лічильників: кількість обертів турбінки n за одиницю часу пропорційна середній швидкості потоку, який проходить через турбінку:

$$n = k_1 V_{сер}, \qquad (6.15)$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності; $V_{сер}$ – середня швидкість потоку в деякому перерізі лічильника з площею F.

Об'ємна витрата через лічильник

$$Q = V_{сер} F, \qquad (6.16)$$

Розв'язуючи разом рівняння (6.15) і (6.16), отримаємо

$$n = (\kappa_1 / F)Q.$$

Тобто, знаючи площу поперечного перерізу лічильника та вимірявши сумарну кількість обертів турбінки за допомогою лічильного механізму, наприклад, за допомогою тахометра, можна виміряти об'ємну витрату потоку газу чи рідини.

У разі вимірювання малих витрат турбінними лічильниками з механічною передачею енергетичні втрати в системі передавання від турбінки до лічильника обертів спричиняють значні похибки. Індуктивне перетворення швидкості обертання турбінки в електричний сигнал вимірювача швидкості зменшує енергетичні втрати. Структурну схему турбінного витратоміра з індуктивним вимірювачем обертів показано на рис. 6.12.

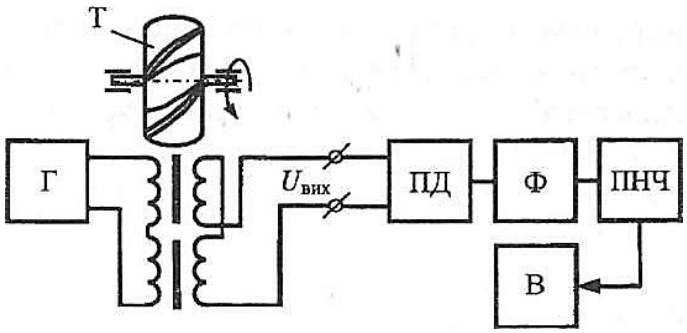


Рис. 6.12. Турбінний витратомір з індуктивним тахометричним перетворювачем:
Г – генератор; Т – турбінка; ПД – підсилювач-демодулятор; Ф – фільтр; ГНЧ – підсилювач низької частоти; В – вимірювач частоти

Індуктивна котушка має первинну обмотку, живлену від генератора змінним струмом частотою 6...8 кГц, і дві вторинні, увімкнені зустрічно. Це підвищує стійкість до завад і дії зовнішніх магнітних полів. Феромагнітні лопаті турбінки (або вставки в них), проходячи повз індуктивний ПВП, змінюють індуктивний опір його обмотки.

На виході ПВІІ створюється напруга $U_{вих}$, промодульована частотою f, яка дорівнює кількості обертів турбінки за секунду, помноженій на кількість лопатей. Після підсилювача – демодулятора та фільтра, у якому виділяється обвідка з частотою, що дорівнює частоті обертання турбінки, помноженій на кількість лопатей, сигнал підсилюється підсилювачем низької частоти і подається на вимірювач частоти. Похибка перетворення частоти в напругу (вимірюється автоматичним потенціометром) не перевищує ±0,4%.

Застосовують також фотоелектричні тахометричні перетворювачі, побудовані на появі пульсаційної електричної напруги в колі фотоелемента в результаті переривання обертовою турбінкою променя світла, що падає на фотоелемент. Частота пульсацій напруги в колі фотоелемента пропорційна частоті обертання турбінки. Зазвичай випромінювач, який працює у видимий (електролампочка) ділянці (для непрозорих рідин використовують інфрачервоний випромінювач або виносять обтюраторний диск для переривання променя світла назовні), і фотоелемент розміщують по різні боки турбінки та відокремлюють від вимірюваної речовини прозорим склом.

Для отримання високої частоти фотоструму використовують різні засоби, зокрема кінематично зв'язані з обертовою турбінкою обтюраторний диск, зубчасте колесо або лопаті самої турбінки.

Вади тахометричних витратомірів: зношуваність опор і лопатей (тому вони непридатні для вимірювання речовин, які містять механічні домішки), залежність показань від в'язкості, а отже, й температури контрольованої речовини (до того ж зі збільшенням в'язкості речовини діапазон лінійності характеристики зменшується). Утім, не менш суттєвими є й переваги: швидкодія, висока точність і великий діапазон вимірювання.

Лічильники з аксіальною турбінкою виробляють для труб з діаметрами 4...750 мм і діапазоном вимірювання витрат 0,03...1600 м^3/год ; класи точності – 0,5; 1; 1,5; 2. Лічильники з тангенціальними турбінками використовують за невеликих (зазвичай до 50 мм) діаметрів труб для вимірювання малих витрат (верхня границя вимірювання – 3...30 м^3 /год).

Турбінні витратоміри, які використовуються в молочній промисловості

На рис. 6.13 показаний датчик турбінного витратоміра. Він складається з датчика, частотного перетворювача і вимірювального приладу. Датчик складається з частини трубопроводу, в якому встановлена невелика турбіна 1 із запресованим в неї магнітом 3. Під тиском потоку молока турбіна обертається. Частота її обертання пропорційна швидкості потоку. Електричні сигнали від турбіни подаються на електронний блок, перетворяться в цифрове значення, що визначає витрату молока, що проходить через трубопровід. Похибка показів складає ±0,25-0,5 %.

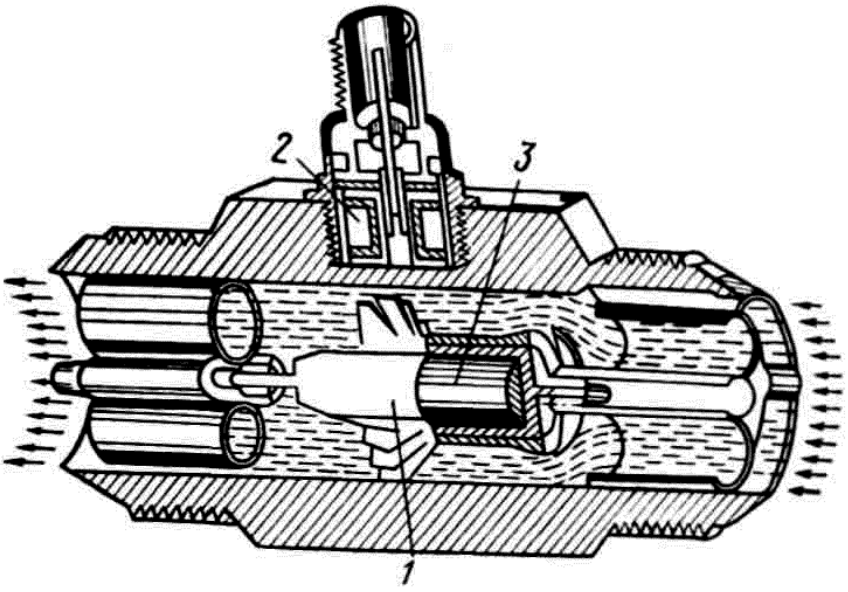


Рис. 6.13. Турбінний датчик витратоміру:
1 – лопатева турбіна; 2 – котушка; 3 – магніт

6.5.3. Кулькові витратоміри

Рухомий елемент кулькових витратомірів – кулька – безупинно рухається по колу Цей рух забезпечується або гвинтовим напрямним

апаратом, який закручує потік, або ж тангенціальним підведенням вимірюваної речовини.

Перетворювач кулькового витратоміра з тангенціальним підведенням вимірюваної речовини показано на рис. 6.14. Частота обертання кульки 1 по колу перетворюється в електричний частотний сигнал індукційним або індуктивним перетворювачем (на рис. 6.14 не показано). Обмежувальне кільце 2 утримує кульку від переміщення вздовж осі труби.

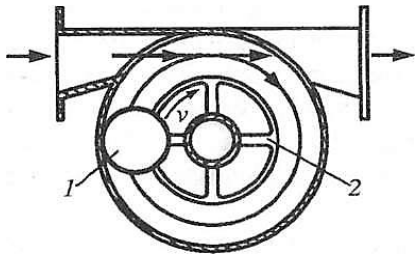


Рис. 6.14 Перетворювач витрати кулькового витратоміра з тангенціальним підведенням контрольованої речовини:
1 – кулька; 2 – обмежувальне кільце

Перетворювачі з тангенціальним підведенням вимірюваної речовини застосовують для вимірювання малих витрат. Вони простіші й небезпека засмічення в них менша. Зазвичай кульки виконують у вигляді феромагнітної порожнистої сфери, покритої поліпропіленом, поліетиленом або іншою пластмасою. Зі збільшенням в'язкості рідини скорочується діапазон вимірювання, у якому зберігається сталість градуювання кулькового витратоміра.

Кулькові витратоміри застосовують для вимірювання максимальних витрат від 2,5 до 400 м^3/год у трубопроводах діаметром 32... 150 мм. Зведена похибка кулькових витратомірів становить ±1,5% у межах 30... 100 % Q_{max} і ±2.5% у межах 20...30% Q_{max}. Втрата тиску для Q_{max} не перевищує 50 кПа.

6.6. Електромагнітні (індукційні) витратоміри

В основу принципу дії покладено закон електромагнітної індукції (закон Фарадея), згідно з яким у провіднику, що перетинає силові магнітні лінії, індукується ЕРС, пропорційна швидкості руху провідника. Якщо як провідник використовувати потік електропровідної рідини, що протікає між полюсами магніту, та виміряти ЕРС, яка індукується в рідині під час перетинання нею магнітного поля, то можна визначити швидкість потоку, а отже, й об'ємну витрату рідини.

Для цього між полюсами магніту *N* та *S*, перпендикулярно до напряму магнітних силових ліній, поміщено відрізок немагнітної труби 3 (рис. 6.15), установленої між фланцями трубопроводу з потоком контрольованої рідини. Внутрішню поверхню труби 3 покрито електроізоляційним матеріалом (емаллю, гумою, склопластиком тощо). У площині, перпендикулярній до силових ліній, біля стінки труби діаметрально протилежно встановлено два

електроди 1 і 2, які за допомогою з'єднувальних провідників підключено до вимірювального приладу 4 (мілівольтметра чи потенціометра).

Різниця потенціалів E на електродах 1 і 2

$$E=BVD, \qquad (6.17)$$

де B – магнітна індукція; V – середня швидкість потоку рідини; D – відстань між кінцями електродів, яка дорівнює внутрішньому діаметрові трубопроводу.

Домноживши та розділивши вираз (6.17) на площу поперечного перерізу трубопроводу F, отримаємо

$$E=kQ,$$

де $k = 4B/(\pi D)$; Q – об'ємна витрата рідини.

Отже, якщо B = const, то індукована ЕРС прямо пропорційна об'ємній витраті вимірюваної рідини.

Для врахування крайових ефектів, спричинених неоднорідністю магнітного поля та шунтувальною дією труби, рівняння домножується на поправкові коефіцієнти $k_м$ і $k_т$, що зазвичай дуже близькі до одиниці. Для вимірювання витрати розплавлених металів застосовують постійне магнітне поле, а для вимірювання витрати звичайних рідин з іонною провідністю для уникнення поляризації електродів – змінне магнітне поле, створюване електромагнітами.

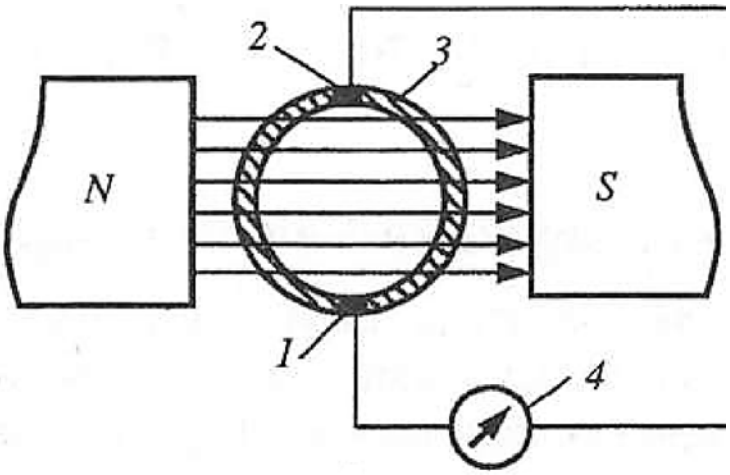


Рис.6.15. Схема електромагнітного витратоміра:
1,2 – електроди; 3 – відрізок труби; 4 – вимірювальний прилад

У разі живлення електромагнітів струмом промислової частоти f поле має синусоїдну форму і його індукція $B = B_{max} \sin 2\pi ft$. У цьому випадку пропорційна витраті ЕРС змінюється за рівнянням

$$E = 4 B_{max} Q \sin 2\pi ft /(\pi D). \qquad (6.18)$$

Останнім часом більше почали застосовувати змінне поле низької частоти та особливої форми.

Використання змінного магнітного поля створює ефекти, котрі спотворюють корисний сигнал. Найбільш значущий з них трансформаторний ефект, від якого завада досягає 20...30 % від корисного сигналу через

наведення ЕРС в електричному колі, створюваному рідиною, електродами, з'єднувальними провідниками та вторинними приладами. Джерелом наведеної ЕРС завади є первинна обмотка електромагнітів.

Для зменшення впливу трансформаторної ЕРС використовують різні способи. Один з них полягає у використанні двох індукційних ПВП, увімкнених так, щоб магнітні поля в них були напрямлені протилежно. Додаткові ЕРС взаємоіндукції при цьому (однакові як за величиною, так і за фазою, але протилежні за напрямом) взаємно компенсуються в первинній обмотці вихідного трансформатора. На точність вимірювання електромагнітних витратомірів впливають і інші чинники, котрі визначаються конструкцією витратомірів та умовами вимірювання. Це може бути враховано через уведення у вираз (6.18) поправкових коефіцієнтів.

Електромагнітні витратоміри мають і значні переваги: відсутність втрати тиску, лінійність шкали, можливість застосування в трубах будь-якого діаметра, менші довжини прямих ділянок труб порівняно з іншими витратомірами (оскільки вимірювання майже не залежить від розподілу швидкості в трубопроводі), висока швидкодія (це особливо важливо для вимірювання витрат швидкоплинних потоків та для використання у системах автоматичного керування), можливість вимірювання витрат агресивних, абразивних рідин, незалежність показань від в'язкості та густини (а отже, й температури) вимірюваної речовини (тому такі витратоміри можна застосовувати для суспензій і в'язких рідин), а також від характеру потоку (ламінарного чи турбулентного).

За їх допомогою можна також вимірювати витрату водопровідної води, кислот, лугів із застосуванням відповідного внутрішнього покриття (тефлону, емалі, скла) робочого відрізка труби і матеріалу електродів (титану, платини) та інших рідин, використовуваних у хімічній промисловості, соків, сиропів і різноманітних рідин у харчовій промисловості, різних водяних розчинів у алюмінієвій та інших галузях промисловості, розплавлених металів, стічних рідин тощо. Вони придатні для вимірювання витрат рідин і пульп, питома електропровідність яких не менша 10^{-5} См/м. Але електромагнітні витратоміри непридатні для вимірювання витрат газу та пари, а також рідин діелектриків – таких, як спирти та нафтопродукти.

Індукційні витратоміри, які використовуються в молочній промисловості.

Індукційний витратомір складається з датчика і вторинного вимірювального приладу (рис. 6.16). Датчиком є кожух 2, в якому знаходиться немагнітна труба 6, внутрішня поверхня якої має покриття 3 (фторопласт). Усередині труби поміщено один проти одного два електроди 1, які з’єднані з приладом. На зовнішній стороні трубопроводу закріплений електромагніт, що створює рівномірне магнітне поле.

В основі принципу вимірювання такого датчика є закон електромагнітної індукції Фарадея. Згідно даного закону в провіднику, що рухається в магнітному полі, виникає індуктивна напруга. У магнітно-

індуктивному принципі вимірювання рухомому провіднику відповідає поточне струмопровідне середовище. Завдяки двом вертикально розташованим котушкам збудження створюється постійне магнітне поле. Горизонтально, по відношенню до цього поля за допомогою двох електродів з неіржавіючої сталі знімається індукована напруга. Ця напруга прямо пропорційна швидкості потоку середовища. На підставі відомого умовного проходу трубопроводу він перераховується в об'ємну витрату.

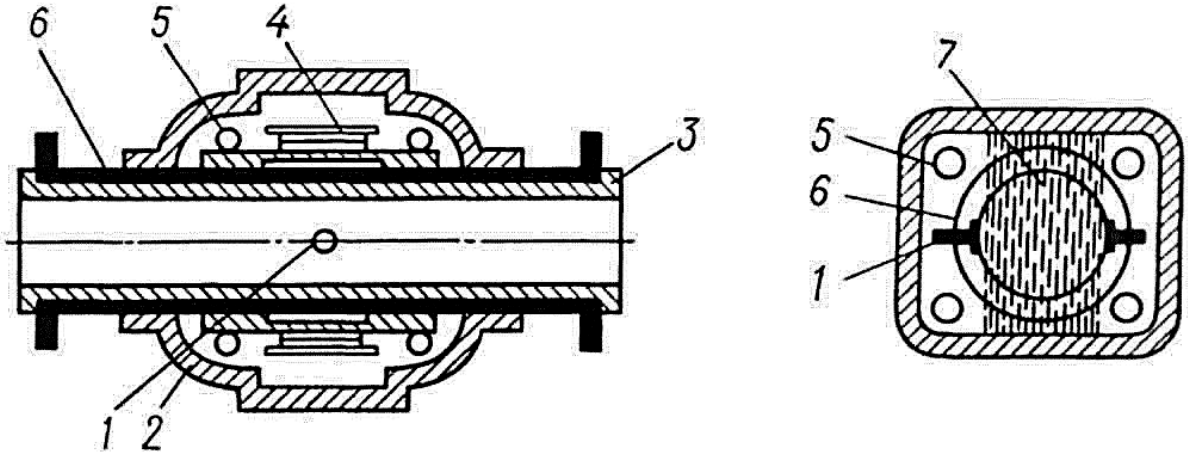


Рис. 6.16. Індукційний витратомір:
1 – електроди; 2 – кожух; 3 – покриття;
4 – сердечник; 5 – обмотка; 6 – труба; 7 – електромагнітне поле

Індукційний витратомір FMI (рис. 6.17) використовується для вимірювання витрати середовища (рідини, пюре, пасти) і її об’ємів в харчовій та фармацевтичній промисловості. Діапазон вимірювань від 30 до 640 л/год.· Підходить для роботи з системами дозування та фасування продуктів.



Рис. 6.17. Індукційний витратомір FMI

6.7. Вихрові витратоміри

В останні роки різко зросло виробництво вихрових витратомірів, принцип дії яких ґрунтується на ефекті Кармана. Останній полягає в тому, що коли в потоці контрольованого середовища поставити перпендикулярно

до потоку призму з гострими ребрами, то на цих ребрах відбувається зрив потоку з утворенням вихорів (вихрових доріжок).

Основним елементом вихрового витратоміра є призма 1 (рис. 6.18) з гострими ребрами, яка встановлюється у трубопроводі 2 перпендикулярно до напряму потоку і на гострих ребрах якої утворюються вихори 3.

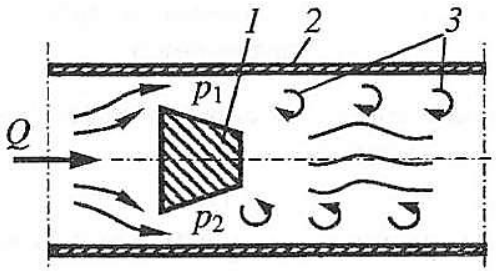


Рис. 6.18. Принцип роботи вихрового витратоміра:
1 – призма з гострими ребрами; 2 – трубопровід; 3 – вихори

Частота f цих вихорів, виражена в безрозмірному вигляді, визначає число Струхаля S:

$$S = fD / V = \varphi(\mathrm{Re}),$$

де D – діаметр трубопроводу; V – швидкість потоку.

Число Струхаля для чисел Рейнольдса в діапазоні $3\cdot10^2$ ...$2\cdot10^5$ є сталим: fD / V = 0,185. Тому частота проходження цих вихорів (їх називають вихорами Кармана) із високою точністю буде пропорційною швидкості потоку, а за відомої площі перерізу витратоміра – об'ємній витраті Q, тобто

$$f = kQ \qquad (6.19)$$

де k – коефіцієнт пропорційності вихрового витратоміра, який визначають окремо для кожного приладу його градуюванням.

Вихори 3, що проходять у зоні призми 1, утворюють поле змінного пульсуючого тиску, пропорційного частоті f, що дозволяє вимірювати їх частоту. Переріз призм може бути різноманітної форми. При цьому картина вихорів за призмою залежить від виду перерізу призми. Однак для всіх видів призм характерне утворення пульсуючих тисків p_1 і p_2 (рис. 6.18), частоту яких можна досить легко перетворити в електричні вихідні частотні сигнали за допомогою різних перетворювачів (терморезистивних, п'єзоелектричних, індукційних тощо).

Приклад загальної конструкції п'єзоелектричного перетворювача різниці пульсуючих тисків показано на рис. 6.19. Перетворювач містить встановлену в трубопроводі 1 призму 2, у якій розміщено приймальні камери 6, динамічний елемент (пластинку) 8 і п'єзоелектричний перетворювач 5. Для зняття електричного сигналу по обидва боки п'єзоелектричного перетворювача закріплено дві обкладинки 4 з електричними виводами 3, загерметизованими в тілі призми 2.

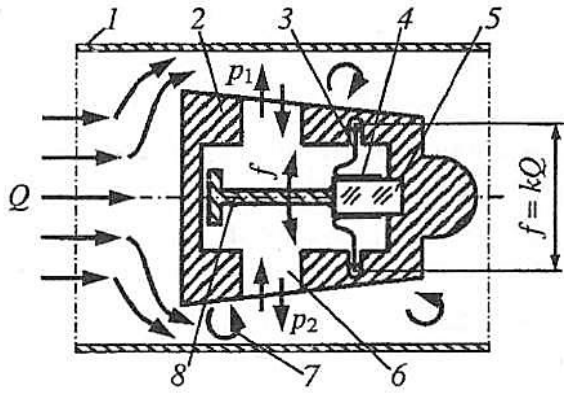


Рис. 6.19. Схема вихрового витратоміра з п'єзоелектричним перетворювачем:

1 – трубопровід; 2 – призма; 3 – електричні виводи; 4 – обкладинки; 5 – п'єзоелектричний перетворювач; 6 – приймальні камери; 7 – вихори; 8 – динамічний елемент

Під впливом вихорів 7 у приймальних камерах 6 виникає різниця пульсуючих тисків Δp, що збуджує коливання пластинки 8, частота яких пропорційна частоті проходження вихорів f. Оскільки пластинка 8 жорстко закріплена на п'єзоелектричному перетворювачі 5, коливання пластинки деформують п'єзоелемент 5, і на його обкладинках 4 виникає змінна напруга з частотою f, яка також пропорційна витраті Q потоку, згідно з рівнянням (6.19).

Вихрові витратоміри можуть бути додатково укомплектовані перетворювачем надлишкового тиску (зазвичай тензометричним), розміщеним перед тілом обтікання, та перетворювачем температури, розміщеним у приймальній камері 6 (на схемі не показано). У процесі цифрової обробки сигналів перетворювачів пульсацій тиску, температури та надмірного тиску мікропроцесорним пристроєм відбуваються фільтрація паразитних складових, зумовлених впливами вібрації, флуктуації тиску й температури потоку, та формування вихідних сигналів витрати, тиску та температури у вигляді цифрового коду.

Основні переваги вихрових витратомірів: вони не містять будь-яких рухомих елементів усередині трубопроводу; можливість вимірювання витрат потоків рідини, пари та газу (зокрема забруднених та агресивних); лінійність шкали у великому діапазоні вимірювання; висока точність вимірювання (похибка ±0,5...1,5 %); стабільність показань; можливість отримання універсального градуювання (більшість конструкцій поки що потребують індивідуального градуювання). Найчастіше їх застосовують для вимірювання витрат потоків рідини. Як недоліки цих витратомірів слід відзначити значні втрати тиску, що сягають 30...50 кПа, непридатність до вимірювання за малих швидкостей потоків, потреба у стабілізації течії контрольованої речовини (оскільки можуть виникати нестійкості, пов'язані з тривимірністю течії) – для цього використовують різні засоби стабілізації потоку (наприклад, ґрати, струменевипрямлячі).

Застосування засобів стабілізації потоку дозволяє також розширити можливості застосування вихрових витратомірів. Сфера їх застосування починається з чисел Re_{min} = 2,5 104. Але установивши перед тілом обтікання сітку, що створювала більш-менш рівномірне поле швидкості, вдавалося зменшити Re_{min} аж до 5 102.

Різні моделі вихрових витратомірів мають клас точності 1...2. їх можна встановлювати на трубопроводах діаметрами 15.. .2000 мм для газів та 50... 1200 мм для рідин, забезпечуючи вимірювання витрати газів у діапазоні 9...2 000 000 м^3/год, рідин – 1...25 000 м^3/год.

6.8. Кореляційні витратоміри

Найперше кореляційні витратоміри призначені для вимірювання багатофазних речовин і різних потоків, що мають які-небудь неоднорідності. Зазвичай навіть більшість однофазних потоків, не кажучи вже про багатофазні, не строго однорідні. Тому ті чи інші властивості або параметри потоку (густина, електропровідність, температура тощо) невпинно змінюються, і ця зміна має випадковий характер. Якщо за допомогою корелометра визначити абсцису максимальної ординати взаємної кореляційної функції двох параметрів потоку одного й того ж роду, які випадково змінюються у двох перерізах, віддалених один від одного на невелику відстань L, то ця абсциса відповідатиме часові $\tau_п$ переміщення потоку на відстань L. Знаючи площу поперечного перерізу потоку F, його об'ємну витрату Q_0, можна визначити за формулою

$$Q_0 = kFL / \tau_п$$

де k - коефіцієнт, яким враховують вплив профілю швидкостей, властивостей речовини та характеру вимірювального пристрою.

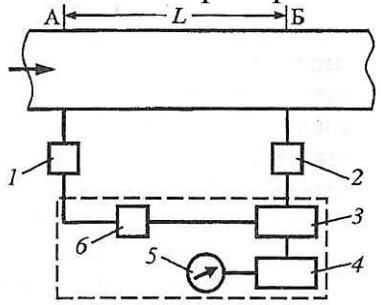


Рис. 6.20. Схема кореляційного витратоміра:
1,2 – ПВП; 3 – помножувальний блок; 4 – блок інтегрування; 5 – вимірювальний прилад; 6 – блок часового зсуву

Принципову схему кореляційного витратоміра показано на рис. 6.20. Зміна того або іншого параметра потоку, наприклад концентрації окремих його фаз, сприймається в перерізах А та Б двома ПВП 1 і 2. Сигнали $x(t)$ *і* $y(t)$, вироблювані цими перетворювачами, зображено на рис. 6.21, *а.* Хоча сигнали $x(t)$ *і* $y(t)$ мають випадковий характер, але завдяки порівняно невеликій відстані L між перерізами *А* і *Б* вони мають тісний кореляційний зв'язок.

Форма сигналу $x(t)$ випереджає форму сигналу $y(t)$ на час $\tau_п$ необхідний для переміщення частинок потоку від перерізу А до перерізу Б. Для вимірювання цього часу служить корелометр (рис. 6.20), що складається із блоків 3, 4, 6 і вимірювального приладу 5. Блок 6 перетворює сигнал $x(t)$ у сигнал – $x(t - \tau)$. Він має регулювальний пристрій, який дозволяє змінювати час затримки τ. Блок 3 формує добуток сигналів $x(t–\tau)y(t)$. Блок 4 інтегрує цей добуток і обчислює його середнє значення $R_{xy}(\tau)$ за певний період часу T. Значення кореляційної функції $R_{xy}(\tau)$ визначається рівнянням

$$R_{xy}(\tau) = \lim(1/T) \int_0^T x(t-\tau)y(t)dt\,.$$

Вигляд цієї функції графічно показано на рис. 6.21, *б*. Вона має порівняно різко виражений максимум, коли час затримки τ дорівнює часові $\tau_п$ переміщення частинок потоку від перерізу А до перерізу Б. Для обчислення кореляційної функції $R_{xy}(\tau)$ і визначення часу $\tau_п$ застосовують також схему корелометра, що ґрунтується на трансформації сигналів $x(t)$ й $y(t)$ у ряди Фур'є та одержанні взаємного спектра цих сигналів.

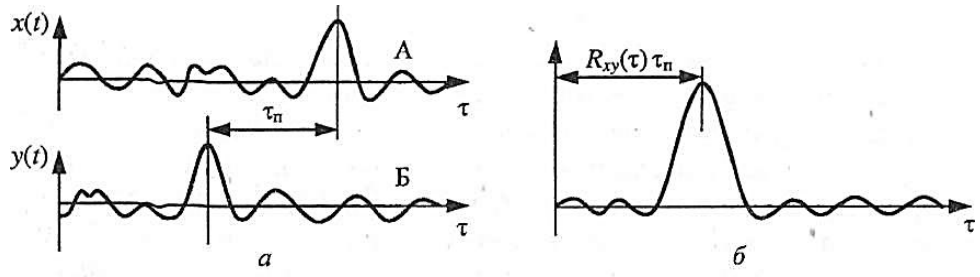


Рис. 6.21. Вигляд сигналів ПВП (а) та кореляційної функції (б) кореляційного витратоміра

Кореляційні витратоміри здебільшого мають тільки два канали перетворення витрати, як показано на рис. 6.20. Але відомі витратоміри з декількома парами каналів перетворення, встановленими послідовно в трубопроводі. Вони доцільні для вимірювання неусталених змінних витрат.

Між кореляційними й мітковими витратомірами багато спільного, зокрема і в тих, і в тих на кінцях певного відрізку трубопроводу довжиною L установлюються ПВП для визначення часу τ проходження потоком цієї відстані. Але в одному разі в потік уводиться певна мітка, і перетворювачі виробляють дискретні сигнали при проходженні потоком контрольного відрізка трубопроводу, а в другому – виробляють неперервні сигнали, що відповідають характерові зміни випадкових процесів у контрольованих перерізах. Особливо близькі до міткових ті кореляційні витратоміри, у яких випадкові процеси, тобто випадкові зміни якого-небудь параметра потоку, наприклад температури за допомогою нагрівника, як і мітки, створюються штучно.

Кореляційні витратоміри можна застосовувати для вимірювання витрати забруднених середовищ, багатофазних потоків і розплавлених металів, вони не призводять до втрати тиску, в більшості випадків не контактують із

вимірюваною речовиною, що є їх перевагами. Недоліки кореляційних витратомірів: вимушена тривалість процесу вимірювання (зі зменшенням часу вимірювання похибка вимірювання зростає); обмежена точність (зазвичай похибка вимірювання витрати не менша за 1,5...2 %). Перед перетворювачами кореляційного витратоміра треба мати пряму ділянку труби, довжина якої після коліна має бути не меншою (5...10)D (тут D – діаметр трубопроводу).

Середньоквадратичну похибку вимірювання об'ємної витрати σ_{Q_0} за допомогою кореляційного витратоміра визначають за формулою

$$\sigma_{Q_0} = 50\sqrt{(\Delta k/k)^2 + (\Delta S/S)^2 + (\Delta L/L)^2 + (\Delta\tau_n/\tau_n)^2 + \left(2\sigma_{T_i}\right)^2}.$$

де Δk, ΔS, ΔL, $\Delta\tau_п$ – максимальні абсолютні похибки вимірювання величин k, S, L, $\tau_п$; σ_{Ti} – середньоквадратична похибка через скінченний час Ti інтегрування сигналів $x(t-\tau)$ й $y(t)$.

Найбільший внесок у похибку вимірювання витрати вносять $\Delta\tau_п$ і (у деяких випадках) Δk. Час переміщення $\tau_п$ та відстань L взаємозалежні: що менша L, то менший і $\tau_п$ і тим більше абсолютні похибки ΔL і $\Delta\tau_п$ будуть впливати на σ_{Q_0}. Але зі збільшенням L зменшується не тільки величина максимуму кореляційної функції, але, що більш важливо, його крутість, а це призводить до збільшення похибки $\Delta\tau_п$. Є й інші причини уникати значних L. Тому доводиться браги порівняно невеликі відстані L, для того щоб час $\Delta\tau_п$ становив, по можливості, частки секунди. Рекомендується залежно від швидкості потоку брати L у межах $(0{,}5...4)D$.

Друге істотне джерело похибки Δk залежить від профілю швидкостей, зумовленого числом Рейнольдса та шорсткістю труби, а також від способу одержання інформації про вимірюваний параметр перетворювачами, установленими в перерізах А та Б. Так, якщо ультразвукові перетворювачі реагують на густину вимірюваної речовини, що перебуває в межах циліндричної області поширення акустичних коливань від однієї стінки труби до іншої, то термоперетворювачі реагують тільки на температуру речовини, що оточує ЧЕ (наприклад, робочий кінець термопари). Це зумовлює дуже велику розмаїтість значень поправкового коефіцієнта k та його похибки Δk. Так, в ультразвукових перетворювачах коефіцієнт k змінюється від 0,93 до 0,95 у разі збільшенні числа Рейнольдса від 10^5 до 10^6. Тому стале значення k в усьому діапазоні вимірювання – від Q_{min} до Q_{max} – спричинює появу відповідної похибки.

Похибка σ_{Ti} зменшується зі зменшенням L і збільшенням періоду інтегрування T_i. Тому час T_i треба брати достатньо великим, хоча це й пов'язано із запізнюванням показань. Але збільшення часу T_i не завжди можливе не тільки через запізнювання показань, а, зокрема, й через мінливість витрати потоку. У цих випадках можна збільшувати кількість контрольних перерізів, які мають бути однаково віддаленими один від одного (на відстань L). Вихідні сигнали всіх перетворювачів підсумовують і

визначають частотний спектр результуючого сигналу. Пік на кривій частотного спектра відповідає частоті, яка дорівнює швидкості потоку, поділеній на відстань *L*.

Гранична похибка вимірювання кореляційними витратомірами об'ємної витрати найчастіше становить ±(2...4) %, причому для двофазних потоків вона зазвичай менша, ніж для однофазних.

Залежно від виду та способу вимірювання параметрів, випадкові коливання яких контролюються кореляційними витратомірами, існує багато різних варіантів їх конструкцій. Один з основних серед тих, що мають промислове застосування, – *ультразвуковий* кореляційний витратомір. В обох контрольних перерізах зовні або всередині труби встановлюють випромінювачі акустичних коливань частотою 0,3...1 МГц. Ці коливання спрямовані перпендикулярно до осі труби й сприймаються п'єзоперетворювачами, що перебувають на протилежному боці труби. Наявність у рідині різних неоднорідностей у вигляді твердих частинок або газових бульбашок спричиняє (внаслідок поглинання та розсіювання) ослаблення акустичних коливань, які надходять на приймальні перетворювачі, сполучені через підсилювачі, демодулятори та фільтри з корелометром.

Ультразвуковим кореляційним витратоміром – лічильником ДРК-М (рис. 6.22, *а*) вимірюють витрати від 0,0008 до 150 $м^3/с$ у трубопроводах із внутрішнім діаметром від 43 до 4200 мм. Він призначений для вимірювання витрати та об'єму води у повністю заповнених трубопроводах; його застосовують як для технологічних цілей, так і для проведення розрахункових операцій. Вимірюване середовище – вода (питна, теплофікаційна, технічна, річкова, стічна), що має такі параметри: температура від 1 до 150 °С; тиск до 2,4 МПа. Витратомір-лічильник можна також використовувати для вимірювання витрат розчинів солей, кислот, лугів тощо.

Витратомір складається з електронного перетворювача *3* і первинного перетворювача, до складу якого входять два акустичні випромінювачі *2* та два приймачі *6*. Первинний перетворювач можна встановлювати без демонтажу трубопроводу, а перевіряти витратомір-лічильник – без демонтажу первинного перетворювача (за допомогою імітаторів).

Відносна похибка вимірювання витрати становить ±1,5 %.

Ще одним різновидом приладів, у яких сторонній промінь, що пронизує внутрішній переріз трубопроводу, модулюється неоднорідностями потоку, є *оптичні* кореляційні витратоміри. Їх переважно застосовують для вимірювання витрат рідини у відкритих потоках, де світлові промені відбиваються від нерівностей, наявних на поверхні рідини. Але їх з успіхом можна застосовувати й для вимірювання витрат гідросумішей, що рухаються трубопроводами, наприклад целюлозної пульпи. У контрольних перерізах, розміщених близько один від одного, поміщають волоконно-оптичні світловоди 1 і 2 (рис. 6.22, *б*). Світлодіоди *3* посилають через світловоди промені світла, які відбиваються частинками целюлози. Відбиті промені повертаються цими світловодами і сприймаються фотоперетворювачами,

сигнали яких після проходу через попередній підсилювач надходять у вимірювальну схему 4. Прилад призначено для вимірювання витрати целюлозної пульпи за її температури до 100 °С і тиску до 1 МПа. Зведена похибка становить ±1 %.

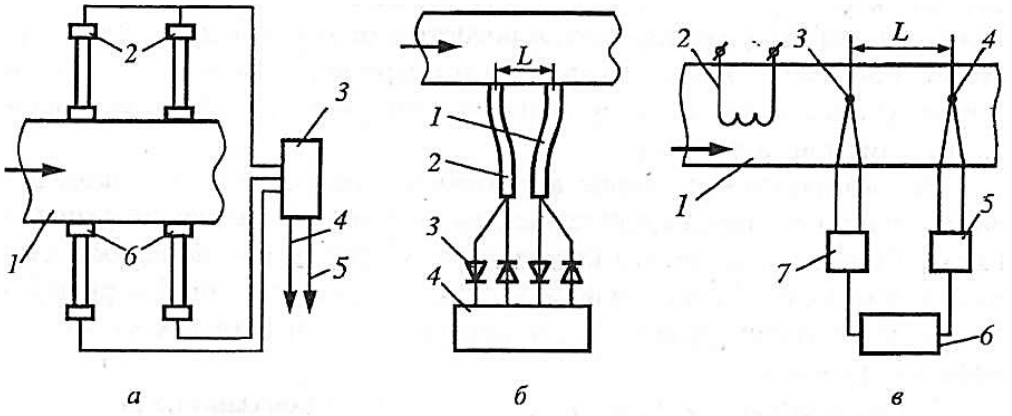


Рис. 6.22. Схеми акустичного (*а*), оптичного (*б*) і теплового (*в*) кореляційних витратомірів:

а: 1 – трубопровід; 2,6 – випромінювач і приймач первинного перетворювача; 3 – електронний перетворювач; 4 – струмовий вихід; 5 – імпульсний вихід; *б*:1,2 – світловоди; 3 – світлодіоди; 4 – вимірювальний блок; *в*: 1 – трубопровід; 2 – нагрівник; 3,4 – термопари; 5,7 – підсилювачі; 6 – корелометр

Діелектричні кореляційні витратоміри, що реагують на змінювання ємності, мають у кожному контрольному перерізі по електроду у вигляді тонкого півкільця, яке ізольоване від трубопроводу і не виступає над його поверхнею. Протилежні електроди утворює сам заземлений трубопровід. Такі витратоміри доцільні для вимірювання витрат повітряних потоків, що переносять порошкоподібні (цемент, борошно, вугільний пил і т. ін.), гранулометричні (зерно, гранульовані міндобрива, гранульований технічний вуглець і т. ін.) та кускові матеріали.

6.9. Вимірювання витрати та кількості сипких речовин та рідин

Потреба вимірювати витрати сипких речовин та рідин є не тільки в промисловості, але і в інших галузях господарського комплексу. Існує багато різновидів сипких речовин, які розрізняються різними властивостями й насамперед розмірами окремих частинок, що виражається навіть у різних назвах сипких речовин: речовини із частинками середніх розмірів понад 10 мм називають кусковими, із частинками розмірів 0,5... 10 мм – зернистими, 0,05...0,5 мм – порошкоподібними, а з частинками, розміри яких менші за 0,05 мм, – пилоподібними.

Крім крупності, сипкі речовини характеризуються формою частинок і гранулометричним складом. Розрізняють округлені, кутасті та гострі форми (залежно від співвідношення між довжиною й іншими розмірами частинки). Гранулометричний склад показує вміст у сипкій речовині частинок різної крупності у відсотках від загальної маси. Якщо відношення розмірів

найбільших і найменших частинок не велике (наприклад, не більше 2,5), то такі сипкі речовини вважають однорідними (за розмірами) або сортованими. Інакше речовини вважають неоднорідними (за розмірами) або рядовими.

Пористістю сипкої речовини називають виражене у відсотках відношення пор і проміжків між частинками до загального об'єму речовини, а *коефіцієнтом пористості* - відношення об'єму пор і проміжків до об'єму твердої речовини. Об'ємна вага сипкої речовини визначається питомою вагою частинок, пористістю й ступенем заповнення пор водою (вологістю). Вологість сипких матеріалів впливає і на інші їх фізичні властивості, зокрема, електричні. Ці властивості залежать також і від того, чи сипка речовина складається з одного, чи з декількох компонентів. Сипкі матеріали – абразивні залежно від форми частинок та їх шорсткості.

Сипкі речовини можуть переміщуватися як у трубопроводах, так і відкритим способом (наприклад, за допомогою стрічкових транспортерів). Від цього залежить вибір методу вимірювання витрат. Рух речовини в трубопроводі може бути самопливним, тобто під дією сили ваги, або ж примусовим, коли за допомогою стисненого повітря трубою рухається двофазне середовище, що складається із твердої та газової фаз.

Для визначення масової витрати сипких речовин застосовують різні методи вимірювання, найбільш поширені з яких такі:

– ваговий – полягає в періодичному чи неперервному вимірюванні сили, утворюваної вагою окремих порцій або ділянок потоку сипких речовин (реалізується ковшовими та стрічковими автоматичними вагами);

– динамічно – ваговий – ґрунтується на вимірюванні сили тиску потоку сипкої речовини на лоток або інше тіло, розміщене на шляху руху потоку (реалізується лотковими витратомірами);

– силовий – використовує залежність від масової витрати силового діяння, що надає потокові різних прискорень (реалізується коріолісовими витратомірами, а також витратомірами з клиноподібними та радіально розташованими лопатками);

– тахометричний – ґрунтується на вимірюванні швидкості обертання турбінки, лопаті чи іншого обертального елемента під дією тиску потоку сипкої речовини (реалізується турбінними витратомірами сипких речовин з аксіальним і тангенціальним розташуванням лопатей різної форми).

Крім наведених, використовують особливі методи вимірювання витрат сипких речовин: флуктуаційний, іонізаційний, кореляційний, оптичний та мітковий.

Є кілька різновидів конструкцій стрічкових або, як їх ще називають, конвеєрних вагів, які реалізують ваговий метод вимірювання масової витрати сипких речовин. Насамперед ваги, що сприймають навантаження ділянки стрічки завдовжки 1,5...2 м із сипким або кусковим матеріалом на ній. Ця ділянка стрічки спирається на кілька роликів, закріплених на рамі, що підвішена до важелів, з'єднана них із маятниковою противагою (квадрантом). Кут повороту квадранта пропорційний навантаженню на раму. У подібних вагах наявні два основні різновиди дії механізму, який враховує сумарну вагу

вантажу, що перейшов через них. В одному з цих різновидів обчислювальний механізм працює циклічно. Час циклу відповідає часові проходження ділянки стрічки, що дорівнює теоретичній довжині платформи ваг. Час обертання обчислювального механізму наприкінці кожного циклу пропорційний навантаженню на платформу в цей момент. Такий спосіб будови обчислювального механізму називають способом циклічного інтегрування. Він аналогічний способові, застосовуваному в більшості інтеграторів-витратомірів змінного перепаду тиску.

Більш досконалий спосіб неперервного інтегрування, згідно з яким показання працюючого безупинно обчислювального механізму пропорційні добуткові швидкості стрічки на її навантаження. При цьому інтегратори бувають як механічні фрикційного типу, так і безконтактні фотоелектричні. В останніх час освітлювання фотоелемента залежить від навантаження на стрічку. Схему безрамних вагів із неперервним фотоелектричним інтегруванням показано на рис. 6.23.

Тут, крім ролика 3, що сприймає зусилля від верхньої завантаженої ділянки стрічки 4, є ролик 1, на який діє вага нижньої холостої ділянки 2. Важіль 11, до якого підвішені ролики 1 і 3, сприймає різницю ваг заповненої та порожньої стрічок, тобто чисту вагу транспортованого матеріалу. Зусилля від важеля 11 через важіль 10 передається до квадранта 9 з вантажами G_1 і G_2, кут повороту якого пропорційний вазі матеріалу. На кінці квадранта 9 закріплено випромінювач (джерело світла) 7 і фотоелемент (приймач) 6, причому фотоелемент розміщено всередині порожнього циліндра 8, на поверхні якого зроблено два вирізи трикутної (у розгортці) форми. Циліндр 8 безупинно обертається за допомогою електродвигуна 5. При цьому тривалість освітлювання фотоелемента 6, а отже, і тривалість створюваного ним електричного імпульсу, пропорційні вазі транспортованого матеріалу, оскільки зі збільшенням цієї ваги випромінювач 7 і фотоелемент 6 за допомогою важелів 10, 11 та квадранта 9 переміщуються донизу, тобто в бік довшої ділянки прорізу на циліндрі 8.

Для визначення швидкості руху стрічки конвеєра на натяжному барабані 14 кріпиться пристрій 15 – генератор синусоїдних коливань, частота яких пропорційна швидкості обертання барабана 14. Інтегрувальний пристрій 13 перемножує імпульси від генератора 15 та фотоелемента 6. Вихідний обчислювальний пристрій 12 показує кількість матеріалу, переміщеного стрічкою транспортера.

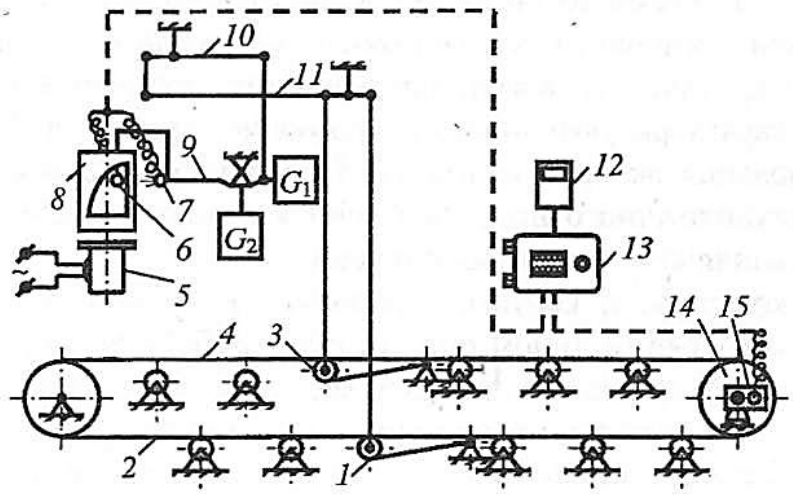


Рис. 6.23. Схема роботи стрічкових ваг із фотоелектричним неперервним інтегруванням:

1,3 – ролики; 2,4 – нижня (порожня) та верхня (завантажена) ділянки конвеєрної стрічки; 5 – електродвигун; 6 – фотоелемент; 7 – випромінювач; *8* – порожнистий циліндр; 9 – квадрант; 10,11 – важелі; 12 – обчислювальний пристрій; 13 – інтегрувальний пристрій; 14 – натяжний барабан; 15 – генератор синусоїдних коливань

Обладнання для визначення кількості рідини (молока)

Кількість молока, що поступає на переробку, молочних продуктів, сировини і допоміжних матеріалів на молокопереробних підприємствах визначають за допомогою ваг, лічильників і витратомірів.

Ваги

Ваги бувають важільні, платформні і конвеєрні.

Ваги важільні випускаються для зважування продукту в тарі і без тари. Важільні ваги для визначення маси продукту в тарі мають вантажопідйомність 500 кг, найменша маса зважуваного на них вантажу – 25 кг, погрішність ±0,5 кг. Ваги забезпечені додатковою шкалою для зважування тари. На таких вагах зважують масло в бочках та ящиках, сир у місткостях, молоко і вершки у флягах.

Молоко і рідкі молочні продукти без тари зважують на важільних та циферблатних вагах з підвісними резервуарами-люльками. Вантажопідйомність важільних ваг – 50, 100, 200, 400 кг, циферблатних – 100, 250, 500 кг. Ціна однієї поділки шкали складає 0,1% від максимальної вантажопідйомності ваг. Кількість зважуваного продукту – не менше 5%, максимальне – не повинно перевищувати 100% вантажопідйомності ваг.

Важільні ваги з пристроєм для автоматичного визначення маси молока показані на рис 6.24. Вони включають власне ваги, пульт управління і шафу з електропневматичними клапанами. Корпус 1 закріплений на стійках 2. Покажчик циферблату 8, встановлений над корпусом, має датчик реєструючого приладу з системою важелів, до якої підвішений вантажеприймальний бак 3. Випускний пристрій 6 обладнаний діафрагмовим приводом випускних клапанів. Ваги мають блок 7 з давачами 4,

контролюючими рівень рідини в баку 3. Електроапаратура ваг поміщена в пульті управління з сигнальними лампами. Електропневматичні клапани, сполучені повітряними шлангами з випускними клапанами, розташовані в розподільній коробці 12.

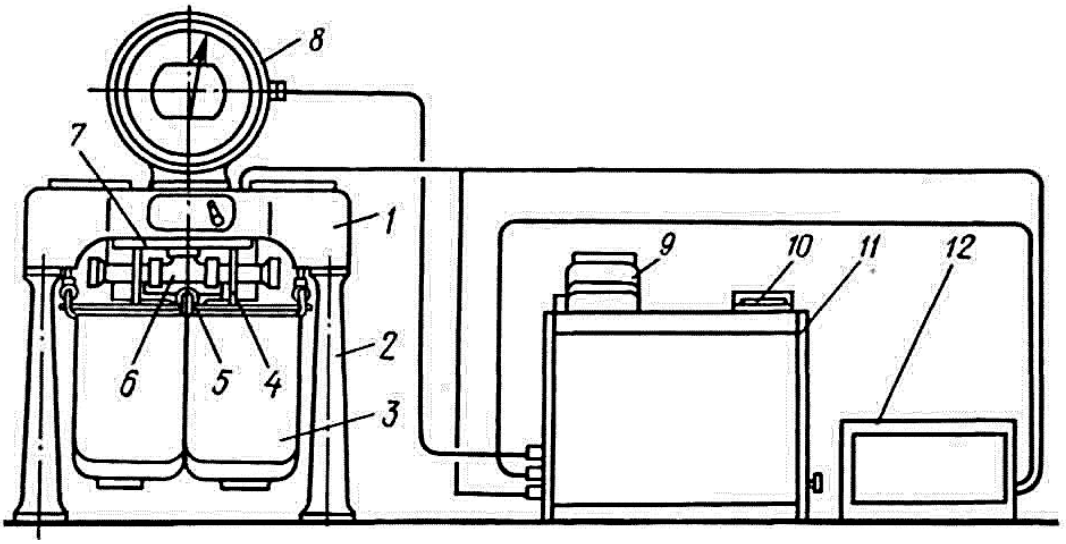


Рис. 6.24. Важільні ваги з пристроєм для автоматичного визначення маси молока:

1 – корпус; 2 – стійки; 3 – вантажеприймальний бак; 4 – стрижньові давачі; 5 – механізм для ручного відкриття випускних клапанів; 6 – випускний пристрій, 7 – блок кондуктометричного сигналізатора рівня; 8 – покажчик циферблату; 9 – реєструюча машина; 10, 11 – панель з кнопками управління і сигнальними лампами; 12 – розподільна коробка

Принцип дії важільних ваг заснований на тому, що під дією маси продукту, поміщеного в бак 3, через системи важелів спрацьовує механізм покажчика циферблату 8, на якому вказується кількість зважуваного продукту. Ваги можуть реєструвати масу як окремих порцій продукту, так і підсумовувати її. Реєстрація здійснюється на спеціальній паперовій стрічці. Межі зважування на таких вагах складають від 25 до 500 кг, погрішності ±1% при їх граничному навантаженні.

Платформні ваги бувають вантажопідйомністю 25 т, погрішність їх складає ±25 кг. Платформні ваги можуть бути з автоматичною видачею касових чеків. Відомі також пристрої, що фіксують кількість продукції, що поступила за певний період.

На рис. 6.25 показані ваги циферблатні. Працюють вони таким чином. Молоко поступає в резервуар 1, зв'язаний через систему тяг 2 з важелями 3, 4, 5. При цьому приводиться в дію механізм покажчика циферблату 6. Демпфер 7 фіксує покази. Після зважування відкривається клапан 8 і молоко виливається в резервуар для зберігання. Для повного звільнення резервуара 1 його дно нахилене у бік клапана.

Конвеєрні ваги (рис. 6.26) мають вантажну платформу 1, по довжині якої розташована ділянка рухомої стрічки транспортера 2. Зважувана маса, що

знаходиться на цій ділянці, сприймається вантажною платформою з подальшою передачею зусилля через систему важелів 3 на ваговимірювальний механізм 4. Результати зважування фіксуються лічильником 5.

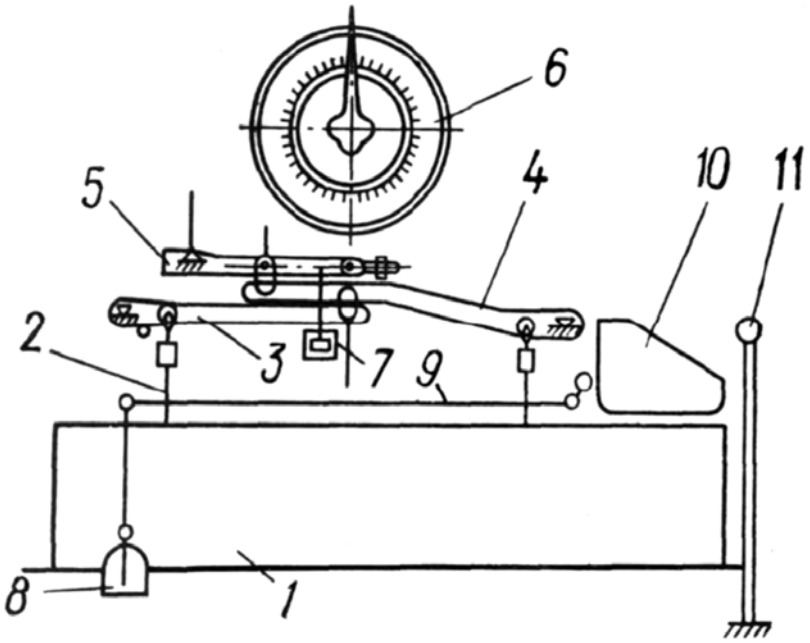


Рис. 6.25. Будова циферблатних ваг:
1 – резервуар; 2 – тяга; 3, 4, 5 – система важелів; 6 – механізм покажчика циферблату; 7 – демпфер; 8 – клапан; 9 – тяга клапана; 10 – сито-цідилка; 11 – опорна стійка

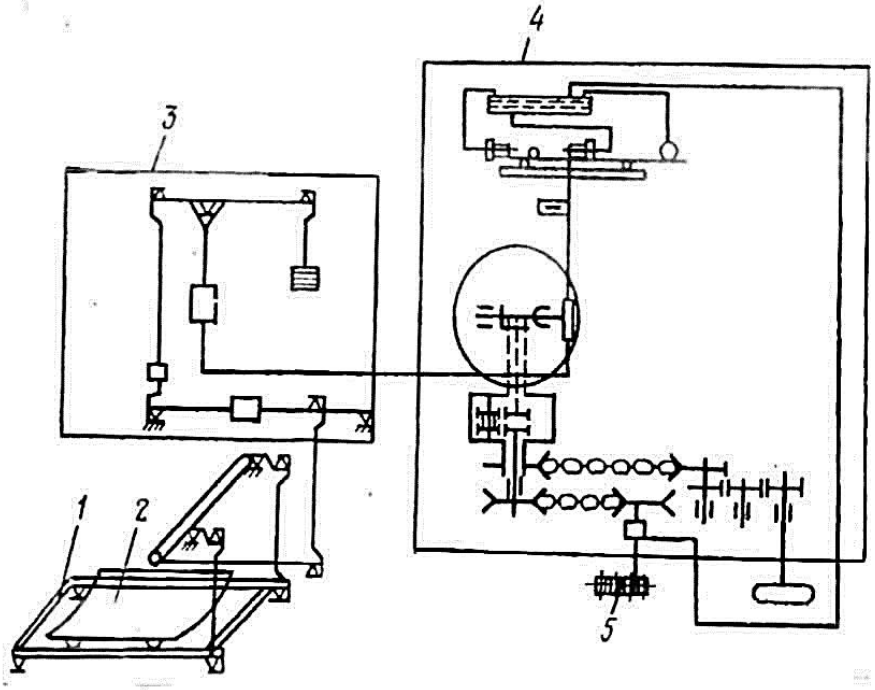


Рис. 6.26. Схема конвеєрних ваг:
1 – вантажна платформа; 2 – стрічка; 3 – система важелів; 4 – ваговимірювальний механізм; 5 – лічильник

На рис. 6.27 показано тензометричний ваговимірювальний пристрій, що є резервуаром 1, на стінках якого закріплені тензорезисторні давачі 2 (електричний міст 3). Працює пристрій таким чином. Молоко поступає в

резервуар 1. В результаті дії маси молока давачі 2 змінюють величину свого опору (за рахунок зміни величини поперечного перерізу провідників), і на вторинному приладі 4 фіксується маса молока.

Тензорезисторні давачі можуть встановлюватися і під опорами резервуара. Кількість датчиків повинна при цьому відповідати кількості опор.

Такі пристрої допускають погрішність при максимально допустимому навантаженні до ±0,5%. Температура повітря може коливатися від 0 до 50°С. Вологість повітря може досягати 98%, але найбільш точні показники давачі видають за вологості до 80%.

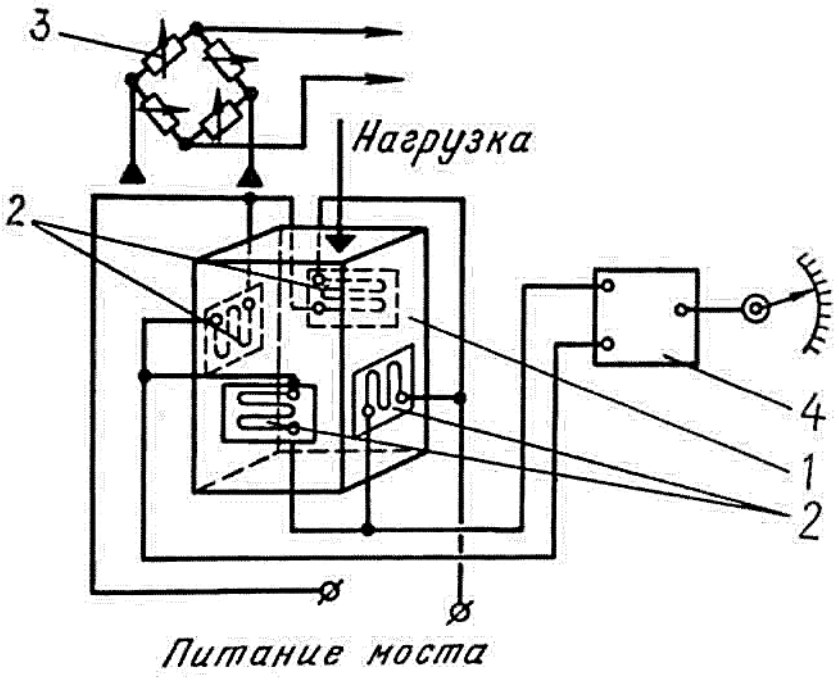


Рис. 6.27. Тензометричний ваговимірювальний пристрій:

1 – резервуар; 2 – тензорезисторні давачі; 3 – електричний міст;

4 – вторинний прилад

Похибка стрічкових або конвеєрних вагів зазвичай становить ±(1...1,5)%.

Контрольні запитання

1. Що таке витрата та через чого можна визначати об’ємні витрати?
2. Які основні групи витратомірів ви знаєте?
3. Які стандартні звужувальні пристрої ви знаєте?
4.Що враховує коефіцієнт витрати α?
5 На чому ґрунтується дія камерних лічильників?
6. Поясніть призначення елементів об'ємного лічильника з овальними шестернями?
7. Поясніть призначення елементів схеми лічильника з кільцевим поршнем?

8. Як можна виміряти об'ємну витрату потоку газу чи рідини?

9. Поясніть призначення елементів схеми турбінного витратоміра з індуктивним вимірювачем обертів?

10. Для чого застосовують кулькові витратоміри?

11.Що покладено в основу принципу дії електромагнітних (індукційних) витратомірів?

12. Які способи використовують для зменшення впливу трансформаторної ЕРС у електромагнітного витратоміра?

13. На чому грунтується принцип дії вихрових витратомірів?

14.Поясніть принцип дії кореляційного витратоміра?

15. Які витрати вимірюють ультразвуковим кореляційним витратоміром – лічильником ДРК-М?

16.Для чого переважно застосовують *оптичні* кореляційні витратоміри?

17. Які методи вимірювання застосовують для визначення масової витрати сипких речовин?

18. Як працює тензометричний ваговимірювальний пристрій?

РОЗДІЛ 7
ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ

7.1. Загальні відомості

Вологість газів, твердих і сипких матеріалів – один з найважливіших показників технологічних процесів у хімічній, текстильній, металургійній та інших галузях промисловості.

Вологість газів вимірюють в абсолютних або відносних одиницях. **Абсолютна вологість** – це маса водяної пари, яка міститься в одиниці об'єму вологого газу. **Відносна вологість** – відношення кількості водяної пари, що міститься в одному кубічному метрі газової суміші, до максимально можливої кількості пари, яка може міститись у цьому ж об'ємі суміші за такої самої температури (у відсотках).

Вологість газів характеризується також ***вологомісткістю*** - масою водяної пари, віднесеної до маси сухого тіла, а також *температурою точки роси*, тобто температурою, за якої газ насичується водяною парою, що міститься в ньому (у градусах Цельсія).

Вологість твердих і сипких тіл характеризується *вологомісткістю* – відношенням маси вологи до маси абсолютно сухого тіла, або *вологістю,* під якою розуміють відношення маси вологи до маси вологого тіла. Ці величини переважно виражають у відсотках.

Вологомісткість U визначають за формулою

$$U = M/M_0=[(M_1–M_0)/M_0]\cdot 100,$$

де M – маса вологи; M_0 – маса абсолютно сухого матеріалу; M_1 – маса вологого матеріалу.

Для переходу від волого місткості U до вологості W і навпаки використовують співвідношення:

$$U=W/(1–W) \text{ та } W= U/(1 + U).$$

Зазвичай у виробничій практиці вимірюють вологість W.

7.2. Вимірювання вологості газів

Абсолютну вологість газів вимірюють ***кулонометричним методом***. Принцип дії кулонометричних гігрометрів ґрунтується на безупинному поглинанні вологи з контрольованого газового потоку плівкою гідрофільної речовини (фосфорного ангідриду) і одночасному розкладанні води на водень і кисень у товщі плівки через електроліз. У сталому режимі значення сили струму електролізу служить мірою вологості аналізованого газу. Чутливий елемент являє собою два платинові електроди, між якими розміщено плівку фосфорного ангідриду (п'ятиоксиду фосфору).

Схему кулонометричного гігрометра для вимірювання вологості газів показано на рис. 7.1. Первинний вимірювальний перетворювач гігрометра виконано у вигляді ізоляційної трубки 1, всередині якої поміщено платинові електроди 2 і 3 у вигляді двох паралельних спіралей, які підключено до джерела постійного струму 5.

Електроди утворюють спіральний проміжок, покритий тонкою плівкою з фосфорною ангідриду, який є високоефективним сорбентом і не розкладається під час електролізу. Плівка поглинає вологу з газу, який пропускається через ПВП зі сталою швидкістю. При цьому неперервно проходять два процеси: утворення фосфорної кислоти та електроліз з регенерацією фосфорного ангідриду:

$$P_2O_5+H_2O \rightarrow 2HPO_3,$$
$$4HPO_3 \rightarrow 2H_2 + O_2 + 2P_2O_5.$$

Струм електролізу, який вимірюється за спадом напруги на резисторі R за допомогою автоматичного компенсатора *4,* пропорційний абсолютній вологості газу:

$$I = \frac{Fz}{m} Q_v a_v ,$$

де F – стала Фарадея; z – основність; m – молекулярна маса води; Q_v– об'ємна витрата газу, м^3/с; a_v – абсолютна вологість, г/м^3.

Серед модифікацій кулонометричних гігрометрів, використовуваних для вимірювання вологості в промислових умовах, значного поширення завдяки високій точності та надійності набули гігрометри типу «Байкал» (модифікацій «Байкал-1», «Байкал-11», «Байкал-2» і «Байкал-21»), призначені для вимірювання вмісту вологи в газах (N_2, повітрі, CO_2, H_2, O_2, інертних газах і їхніх сумішах та інших газах, які не взаємодіють із фосфорним ангідридом).

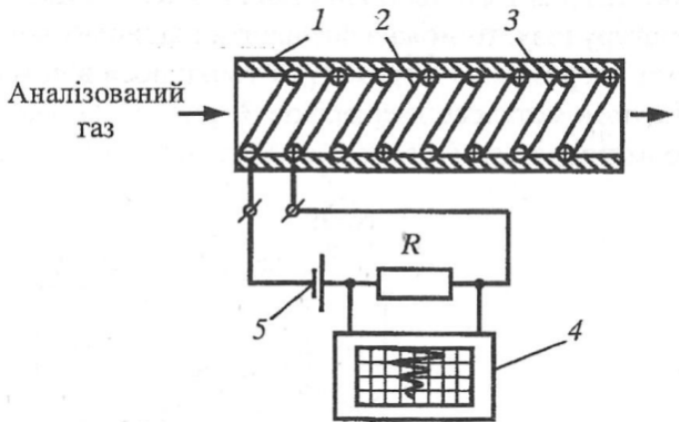


Рис. 7.1. Схема кулонометричного гігрометра:
1 – ізоляційна трубка; 2,3 – платинові електроди; 4 – автоматичний компенсатор; 5 – джерело постійного струму

Гігрометри двох останніх модифікацій мають іскробезпечне виконання, а «Байкал-11» – електричний вихідний сигнал у паралельному двійково-десятковому коді 8–4–2–1. Стала часу гігрометрів «Байкал» становить від 2 до 15 хв – залежно від діапазону вимірювання.

Гігрометр типу «Байкал-5» призначено для вимірювання та сигналізації граничнодопустимих значень вологості повітря. Допустимий вміст механічних домішок становить 0,05 мг/м^3, а пари та аерозолів – 0,1 мг/м^3.

Час початку реагування – 20 с, час перехідного процесу – 15 хв, стала часу становить 150 с. Гігрометри призначені для умов роботи: температури навколишнього повітря 5...50 °С, відносної вологості до 80 %. Витрата газу через гігрометр – 180 л/год. До складу гігрометрів «Байкал» входять вторинні прилади КСП4 відповідного виконання.

Гігрометри типу «Корунд-М» застосовують для вимірювання вмісту вологи в хлоровмісних газах з об'ємним вмістом контрольованого середовища (%): 45… 98 $C1_3$, 0...4 H_2, 0...10 мг/м^3 H_2PO_4 (аерозолі); решта – повітря та CO_2. Стала часу цих гігрометрів становить 10 хв, витрата газу – 180 л/год. До складу гігрометра входять вторинні прилади КСПЗ або «Диск-250». Гігрометри призначені для умов роботи: температури навколишнього повітря 5...50 °С, відносної вологості 30...80 %.

Вимірювання абсолютної вологості газів ***методом точки роси*** полягає у визначенні температури, до якої необхідно охолодити за сталого тиску ненасичений газ для того, щоб він став насиченим. Якщо додатково виміряти температуру газу, то можна визначити і відносну вологість.

У сучасних дзеркальних гігрометрах точки роси в потоці аналізованого газу розміщують металеве дзеркальце 3 (рис. 7.2), яке охолоджується за допомогою напівпровідникового елемента Пельтьє (термопари) 5.

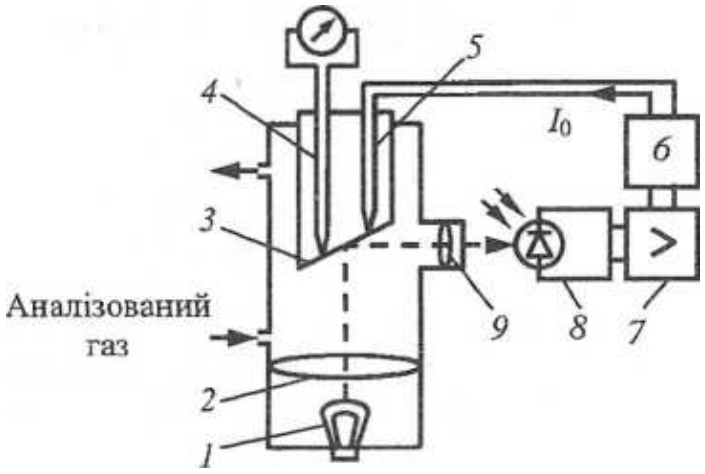


Рис. 7.2. Схема автоматичного вологоміра точки роси:
1 – випромінювач; 2,9 – лінзи; 3 – дзеркальце; 4 – термоелектричний термометр; 5 – елемент Пельтьє; 6 – регулятор струму; 7 – підсилювач; 8 – фотоелемент

На дзеркальце 3 від випромінювача 1 через лінзу 2 спрямовується промінь світла, який, відбившись від нього, через другу лінзу 9 потрапляє на фотоелемент 8. Викликаний у фотоелементі струм підсилюється і через регулятор струму *6* живить елемент Пельтьє 5. Якщо на дзеркалі немає вологи,

то промінь світла від дзеркала майже повністю відбивається і потрапляє на фотоелемент, викликаючи струм зворотного зв'язку і відповідно – охолодження дзеркала. Температура дзеркала буде зменшуватися доти, доки на дзеркалі не випаде роса. Тоді на фотоелемент буде потрапляти ослаблений потік світла, струм через елемент Пельтьє зменшуватиметься, а температура дзеркала почне підвищуватися внаслідок нагрівання аналізованих газів. Це призведе до випаровування роси, збільшення світлового потоку, підвищення струму зворотного зв'язку й охолодження дзеркала. Отже, температура дзеркала буде підтримуватися близькою до температури точки роси, яку вимірюють контактним ТП 4.

Час встановлення показань такого гігрометра - декілька секунд. Автоматичні дзеркальні гігрометри точки роси порівняно дорогі, але їх можна використовувати і для дослідження вологості агресивних газів. Похибка вимірювання за температури точки роси, вищої за 0 °С, становить ±0,5 °С, а за від'ємних значень точки роси може досягати декількох градусів.

Недоліками методу точки роси вважають складність фіксації моменту випадання роси, залежність температури точки роси від стану поверхні дзеркала тощо.

Наявність характерних ліній в інфрачервоній (ІЧ) області спектра поглинання води (рис. 7.3) дозволяє майже безінерційно визначати абсолютну вологість газу вимірюванням оптичної абсорбції цих ліній під час пропускання через контрольоване середовище ІЧ-проміння.

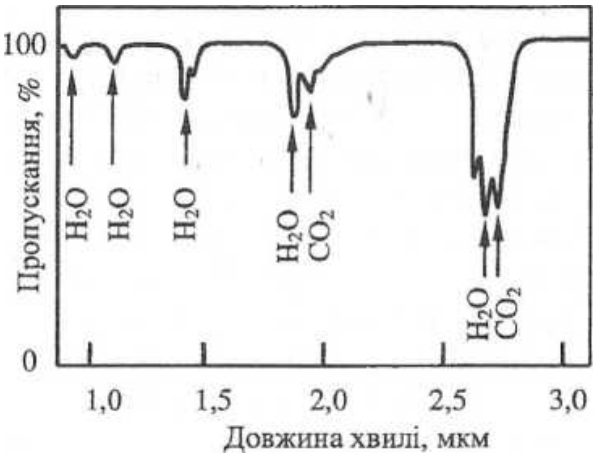


Рис. 7.3. Інфрачервоний спектр пропускання вологого повітря

Для реалізації ***методу ІЧ-випромінювання*** потрібен ІЧ–абсорбційний газоаналізатор, висока вартість якого обмежує застосування цього методу. Серед переваг методу можна виокремити швидкість вимірювання та його високу відтворюваність.

Для вимірювання відносної вологості газів за додатних температур (0...100 °С) широко використовують ***психрометричний метод,*** що ґрунтується на вимірюванні різниці температур $t_с$ і $t_м$ двох термоперетворювачів: сухого, розміщеного в досліджуваному газовому середовищі, та мокрого, який змочений водою і перебуває в термодинамічній рівновазі з навколишнім газовим середовищем. У цьому випадку чим менша вологість аналізованого

газу, тим інтенсивніше випаровування з поверхні ЧЕ мокрого термоперетворювача і тим нижча його температура.

Під час випаровування вологи зі зволоженої поверхні мокрого термометра його температура знижується. У результаті між сухим і мокрим термометрами виникає різниця температур, яку називають ***психрометричною різницею.*** Відносну вологість залежно від психрометричної різниці ($t_с - t_м$) виражають залежністю

$$\varphi = [\rho_м - A(t_с - t_м)]/\rho_с ,$$

де $\rho_м$ – пружність пари, яка насичує аналізоване середовище за температури $t_м$ мокрого термометра; $\rho_с$ – пружність пари, що насичує аналізоване середовище за температури $t_с$ сухого термометра; A – психрометричний коефіцієнт, який залежить від конструкції психрометра, швидкості обдування мокрого термометра газом і тиску газу.

Коефіцієнт A визначають за довідковими психрометричними таблицями, складеними для певних конструкцій психрометрів. Найбільший вплив на величину A чинить швидкість обдування мокрого термометра. Зі зростанням швидкості газового потоку значення коефіцієнта A швидко зменшується і за швидкостей понад 2,5...3 м/с залишається постійним. Тому в промислових психрометрах передбачаються пристрої, що забезпечують постійну швидкість газового потоку, що не нижча за 3…4 м/с.

В електричних психрометрах для визначення температури застосовують ТП, напівпровідникові та металеві ТО. Термоелектричні перетворювачі зазвичай виготовляють у вигляді термобатарей, поділених на дві групи, одна з яких змочується. Електрорушійна сила, вимірювана на виводах термобатарей, пропорційна психрометричній різниці температур. Для її вимірювання в електричних психрометрах використовують переважно стандартні ТО. В автоматичному психрометрі (рис. 7.4) різницю температур вимірюють за допомогою терморезистивних перетворювачів – сухого $R_{т.с}$ та мокрого $R_{т.м}$, увімкнених у двомостову компенсаційну вимірювальну схему.

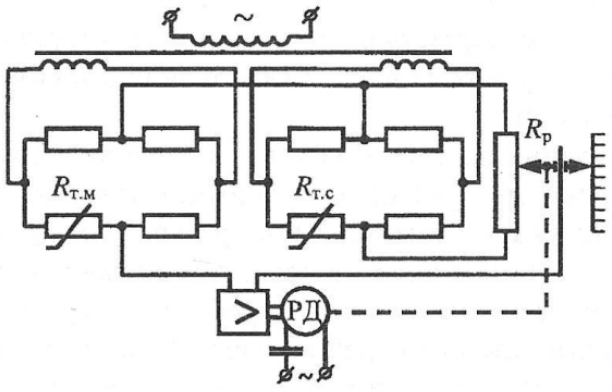


Рис. 7.4. Принципова схема двомостового компенсаційного психрометра

Напруга розбалансу кожного з мостів буде пропорційною відповідно температурі $t_с$ і $t_м$, а різниця цих напруг – мірою вимірюваної вологості. А

оскільки напруга розбалансування двомостового кола автоматично зрівноважується спадом напруги на реохорді R_P, то переміщення повзунка реохорда і відповідно покажчика відлікового пристрою можуть бути також мірою вимірювальної вологості, а шкала – проградуйованою в одиницях вимірюваної величини.

Переваги психрометричного методу вимірювання вологості – порівняно висока точність, висока чутливість за температури понад 0°С; недоліки – зменшення точності та чутливості за низьких температур, нестабільність функції перетворення (психрометричної сталої), зумовлена впливом зовнішніх чинників.

7.3. Вимірювання вологості твердих і сипких матеріалів

Вимірювати вологість твердих і сипких матеріалів можна різними методами, зокрема кондуктометричним, діелькометричним (ємнісним), інфрачервоним, нейтронним методами, методом ядерного магнітного резонансу (ЯМР) та ін.

Кондуктометричний метод грунтується на залежності питомої провідності (активного опору), виміряної на постійному струмі, від умісту вологи. Вимірявши провідність чи опір за допомогою відповідних графіків залежності опору від вологості, визначених експериментально для різних матеріалів, оцінюють ступінь вологості матеріалу.

Перевагою методу є висока чутливість, що визначається степеневою залежністю опору від вологості. Однак зміну опору зумовлює велика кількість чинників, таких як температура, структура матеріалу, наявність електролітів. Тому кондуктометричний метод використовують лише в лабораторних умовах.

Діелькометричний (ємнісний) метод ґрунтується на залежності діелектричних властивостей матеріалу від вологості. Оскільки для сухих речовин діелектрична проникність ε= 2,0...5,0, а для води $\varepsilon_в$ = 81,0, то невелика зміна вологості матеріалу призводить до значної зміни результуючої діелектричної проникності. Як вимірювальні кола в ємнісних вологомірах найчастіше використовують трансформаторні мости з тісним індуктивним зв’язком плечей, а також резонансні вимірювальні кола.

Інфрачервоний метод ґрунтується на можливості використання характерних ліній поглинання води під час вимірювання вологості повітря. Цей метод застосовують також для вимірювання вологості різних матеріалів. Для визначення вологовмісту рідин вимірюють поглинання смуг 1,47 або 1,94 мкм у прохідному світлі; для вимірювання вологості матеріалу застосовують метод вимірювання відбиваного його поверхнею випромінювання, що дозволяє визначати вологовміст тільки поверхневого шару. Під час вимірювання вологості сипких матеріалів цю ваду усувають розпушуванням проби безпосередньо перед заглибленням вимірювального елемента.

Метод ядерного магнітного резонансу (метод ЯМР) ґрунтується на поглинанні енергії радіочастотного магнітного поля ядрами атомів водню зі складу води, яка міститься в матеріалі. Ядро атома водню (протон) можна

розглядати як заряджену кульку, яка має механічний і ядерний магнітні моменти й обертається навколо своєї осі. Якщо такий обертовий магнітик (магнітний діполь) помістити в постійне зовнішнє магнітне поле, то його вісь почне обертатися навколо напряму магнітного поля з кутовою швидкістю

$$\omega_0 = \gamma H_0$$

де γ– гіромагнітне число, що характеризує відношення магнітного моменту ядра до його механічного моменту; H_0 – напруженість зовнішнього магнітного поля.

У разі дії на протон додаткового змінного радіочастотного поля, вектор напруженості H_1 якого обертається або коливається і перпендикулярний до вектора напруженості H_0 поля, на магнітний діполь буде діяти пара сил, котра намагатиметься змінити кут між вектором напруженості H_0 поля та вектором магнітного діполя. Якщо при цьому частота і напруга змінного радіочастотного поля напруженістю H_1 збігається з кутовою швидкістю ω_0і напрямом прецесії диполя, то настає своєрідний резонанс – ЯМР. Інтенсивність поглинання досліджуваним зразком енергії у разі ЯМР пропорційна кількості водню в одиниці об'єму матеріалу, тому за величиною поглинання можна однозначно оцінити вміст вологи в матеріалі.

Досліджуваний матеріал поміщають у циліндричну котушку, вісь якої перпендикулярна до напряму постійного магнітного поля. Котушкою пропускається змінний струм високої частоти від спеціального генератора. Резонанс досягається або зберіганням сталості напруженості H_0 і змінюванням частоти змінного струму, або змінюванням у вузьких межах напруженості H_0 за сталої частоти змінного струму. Поглинання радіочастотної енергії визначають за параметрами високочастотного коливального контуру, до якого входить котушка з досліджуваним зразком.

Блок-схему вологоміра, що ґрунтується на ЯМР, показано на рис. 7.5.

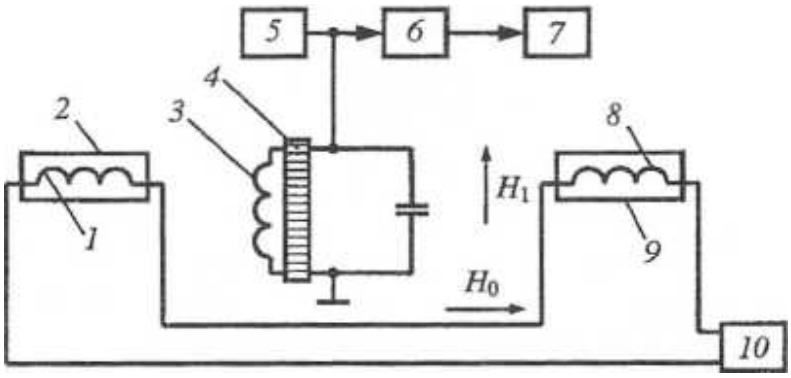


Рис. 7.5. Схема вологоміра на основі ЯМР:

1,3,8 – котушки; 2,9 – полюси постійного магніту; 4 – посудина з досліджуваним матеріалом; 5 – генератор високої частоти; 6 – блок підсилення; 7 – вторинний прилад; 10 – генератор низької частоти

Циліндричну посудину 4 з досліджуваним матеріалом розміщено між полюсами 2 та 9 постійного магніту, який утворює в досліджуваному зразку магнітне поле певної напруженості. Посудину зі зразком поміщено у внутрішню порожнину котушки 3, яка входить у паралельний резонансний контур. Останній живиться струмом високої частоти від генератора 5. Полюси постійних магнітів мають розгортальні котушки 1 і 8, які живляться від генератора низької частоти 10. Радіочастотний сигнал підсилюється і детектується блоком 6, а відтак реєструється вторинним приладом 7.

Недоліки ЯМР-методу – потреба у відборі проби та складність апаратури вологоміра.

Нейтронний метод ґрунтується на тому, що нейтронні промені сильно гальмуються легкими атомами водню та безперешкодно проходять крізь елементи з більшим атомним номером. Це явище протягом багатьох років використовують для визначення вологовмісту у великих скупченнях матеріалів, переважно піску, будівельних матеріалів, шлаків, а також бурого вугілля.

Джерело нейтронного випромінювання 6 (рис. 7.6), що містить препарат тривалої дії (зазвичай суміш берилію та радію з періодом півроспаду 150 років), разом з лічильником повільних нейтронів 4 поміщено у вимірювальний зонд 2, який перед вимірюванням занурюється у контрольований матеріал 1.

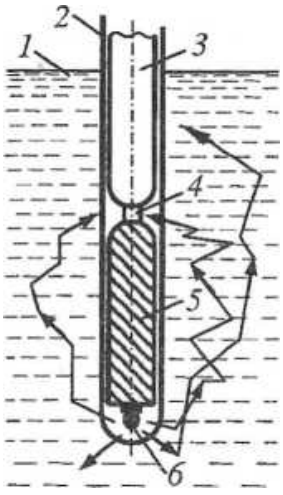


Рис. 7.6. Принцип дії зонда нейтронного вологоміра:
1 – досліджуваний матеріал; 2 – алюмінієва труба; 3 – фотопомножувач;
4 – сцинтиляційний лічильник; 5 – свинцевий захисний екран;
6 – випромінювач

Залежно від вологовмісту, а точніше від умісту водневих атомів у матеріалі, більша або менша частина одержуваних швидких нейтронів розсіюється й гальмується. Газорозрядний або сцинтиляційний лічильник 4 сприймає представницьку частину утворюваних таким чином повільних нейтронів і формує сигнал (у вигляді послідовності імпульсів зі сталою часу близько 1 хв), який є мірою об’ємного вологовмісту матеріалу. При цьому

доцільно інтегрувати вимірювальний сигнал в усьому контрольованому об’ємові матеріалу.

Метод не застосовують для вимірювання вологості матеріалів, які містять змінну кількість зв’язаного водню. Слід зазначити, що іноді поряд із воднем у матеріалі можуть утримуватися елементи, що також поглинають або сповільнюють нейтрони.

Під час сушіння матеріалів в агрегатах, у яких підтримуються постійні умови, між вологістю і температурою висушуваного матеріалу існує чітка залежність – її покладено в основу методу вимірювання вологості за температурою сушіння. Як видно із графіків (рис. 7.7), температура вологого осушуваного матеріалу спочатку знижується в результаті випаровування, а далі залишається сталою доти, доки його поверхня не зволожиться водою, що надходить із внутрішніх шарів матеріалу.

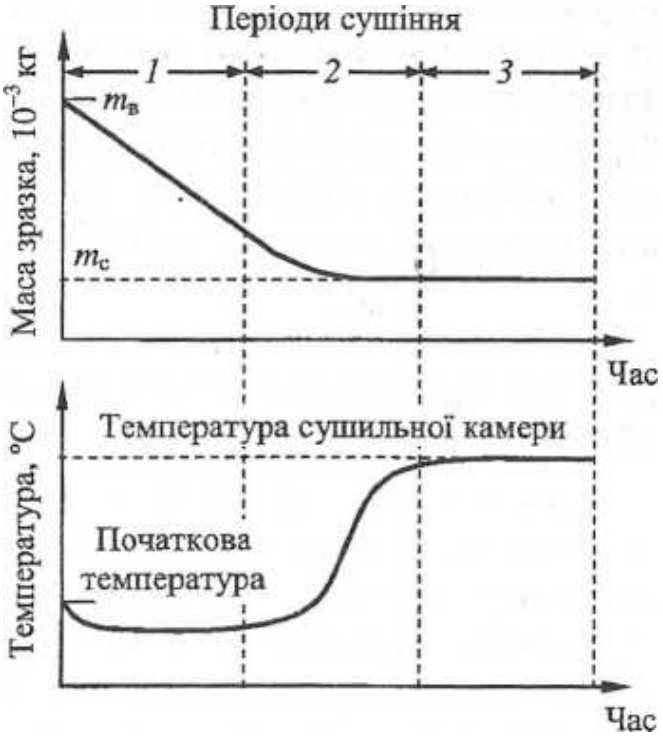


Рис. 7.7. Хід процесу сушіння гігроскопічного матеріалу в атмосфері сушильної камери

Тільки на ділянці гігроскопічної вологості температура матеріалу може підвищитися до температури сушильної камери, зрівнюючись з нею лише в осушеному стані. Безконтактне вимірювання температури осушуваного матеріалу за допомогою низькотемпературних пірометрів забезпечує прийнятні результати для керування сушильним агрегатом.

Попри велику кількість відомих методів вимірювання вологості, вибір найбільш придатного для конкретних умов методу та приладу може виявитися нелегким завданням. Наведені короткі описи технічно найбільш важливих методів вимірювання вологості можуть слугувати лише основою для правильного вибору залежно від реальних умов.

Контрольні запитання

1. Що таке вологомісткість *U* та за якою формулою її визначають?
2. На чому ґрунтується принцип дії кулонометричних гігрометрів?
3. У чому полягає вимірювання абсолютної вологості газів методом точки роси?
4. Поясніть призначення елементів у схемі автоматичного вологоміра точки роси?
5. На чому ґрунтується психрометричний метод вимірювання відносної вологості газів?
6. На чому ґрунтується кондуктометричний метод вимірювання вологості твердих і сипких матеріалів?
7. На чому ґрунтується діелькометричний *(ємнісний)* метод вимірювання вологості твердих і сипких матеріалів?
8. На чому ґрунтується інфрачервоний метод вимірювання вологості твердих і сипких матеріалів?
9. На чому ґрунтується метод ядерного магнітного резонансу вимірювання вологості твердих і сипких матеріалів?
10. На чому ґрунтується нейтронний метод вимірювання вологості твердих і сипких матеріалів?

РОЗДІЛ 8
ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ТВЕРДИХ ТІЛ

8.1. Загальні відомості

Як параметри руху твердого тіла розуміють лінійні та кутові переміщення, швидкість лінійних та кутових переміщень тощо. У якості первинних вимірювальних перетворювачів (чутливих елементів) для вимірювання параметрів руху можуть використовуватися перетворювачі:

а) реостатні перетворювачі;
б) тензорезистивні перетворювачі;
в) індуктивні перетворювачі;
г) трансформаторні перетворювачі;
д) ємнісні перетворювачі;
е) індукційні перетворювачі;
ж) магнітострикційні перетворювачі переміщень.

8.2. Вимірювання лінійних та кутових переміщень з використанням реостатних перетворювачів

На рис.8.1 наведена потенціометрична схема включення реостатного перетворювача [47].

Під дією вимірюваного переміщення повзунок реостата перемішується. Вихідною величиною перетворювача є електричний опір R_x, що обумовлюється положенням повзунка.

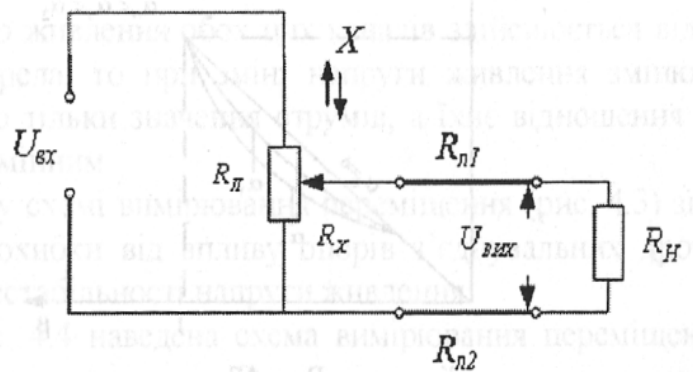


Рис.8.1. Потенціометрична схема включення реостатного перетворювача

Напруга з його повзунка $U_{вих}$ подається на навантаження $R_н$.

Розглянемо залежність напруги $U_{вих}$ від зміни опору R_x перетворювача і від опору $R_п$.

Якщо опір навантаження $R_н >> R_п$ (рис. 8.1). то напруга на навантаженні

$$U_{вих_и} = \frac{U_{вх} \cdot R_x}{R_П} \qquad (8.1)$$

і вона змінюється пропорційно R_x.

У цьому випадку напруга $U_{вих_и}$ пропорційна до переміщення повзунка.

Якщо опір потенціометра $R_{\text{П}}$ є порівнянний з опором $R_{\text{н}}$, то в цьому випадку

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot R_x \cdot R_{\text{и}}}{R_{\text{П}} R_x - R_x{}^2 + R_{\text{П}} R_{\text{Н}}} \tag{8.2}$$

або

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot \beta}{1 + \alpha\beta(1-\beta)} \tag{8.3}$$

де $\alpha = \frac{R_{\text{П}}}{R_{\text{Н}}}$ – коефіцієнт навантаження; $\beta = \frac{R_x}{R_{\text{П}}}$ – відносна зміна опору перетворювача.

На рис. 8.2 наведена залежність $U_{\text{вих}} = U_{\text{н}}$ від β для різних коефіцієнтів α.

З рівнянь (8.1) і (8.2) випливає, що відносна похибка, яка виникає через вплив опору $R_{\text{Н}}$, дорівнює

$$\delta U = \frac{U_{\text{вих}_{\text{Н}}} - U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} = \frac{R_x}{R_{\text{Н}}}\left(1 - \frac{R_x}{R_{\text{Н}}}\right) \tag{8.4}$$

або

$$\delta U = \alpha\beta(1-\beta) \tag{8.5}$$

З рівнянь (8.4) і (8.5) випливає, що максимальне значення похибки δU буде при $R_x = 0{,}5\ R_{\text{п}}$ У цьому випадку похибка

$$\delta U = 0{,}25 \cdot \frac{R_{\text{П}}}{R_{\text{Н}}} \cdot 100\%, \tag{8.6}$$

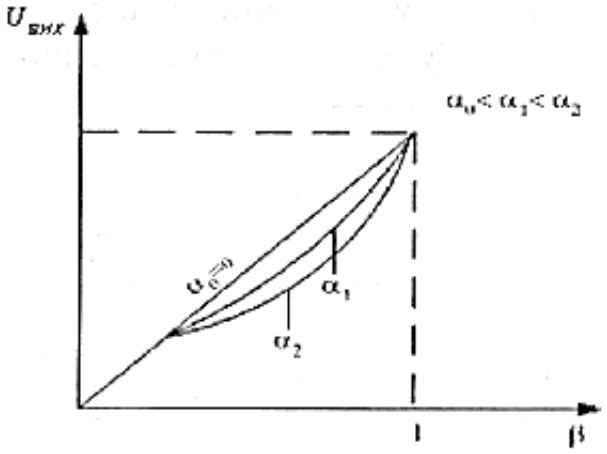


Рис.8.2. Графік залежності виходної напругі реостатного перетворювача від відносної зміни опору перетворювача

Вона може досягати максимального значення 25%, якщо $R_{\text{п}} = R_{\text{н}}$, а R_x=0,5$R_{\text{п}}$

Похибка δUможе бути незначною, якщо опір $R_{\text{н}} >> R_{\text{п}}$.

Джерелами похибок у схемі рис. 8.1, можуть бути нестабільність напруги $U_{\text{вх}}$, вплив опорів з'єднувальних дротів $R_{\text{Л}_1}$ і $R_{\text{Л}_2}$, а також їхні температурні зміни.

На рис. 8.3, *а* реостатний перетворювач включений у коло магнітоелектричного логометра. Логометрична схема включення перетворювача містить два канали $R_{\text{Л}_2}$ і $R_{\text{Л}_3}$, включених послідовно з

великими опорами рамок логометра, а третій канал $R_{л_1}$ включений послідовно в колі живленняU логометра і не впливає на його показники. Таке трипровідне підключення перетворювача до логометра дозволяє виключити вплив опорів з'єднувальних дротів на результат вимірювання. Логометр – це перетворювач, вихідна величина якого є функцією частки від ділення вхідних струмів, що протікають по каналах $R_{л_2}$ і $R_{л_3}$.

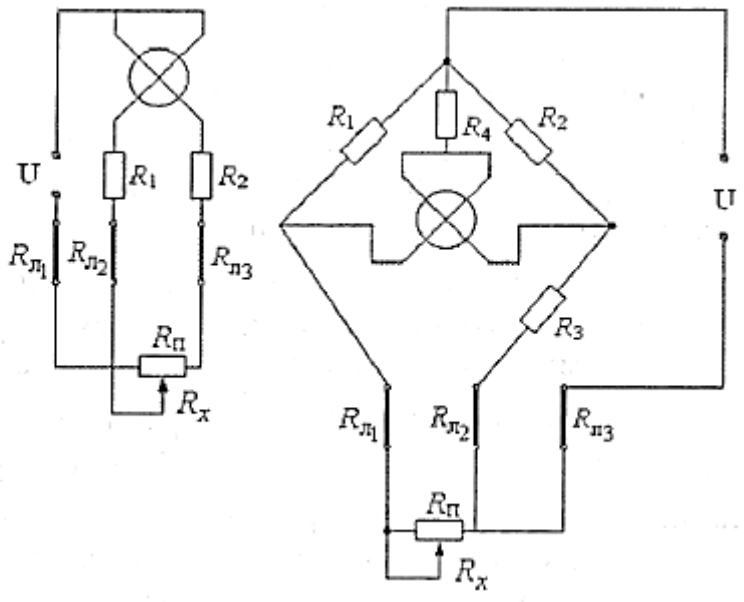
Через те, що живлення обох цих каналів здійснюється від того самого джерела, то при зміні напруги живлення змінюється пропорційно тільки значення струмів, а їхнє відношення залишається незмінним.

Отже, у схемі вимірювання переміщення (рис. 8.3, *а*) значно зменшені похибки від впливу опорів з'єднувальних дротів, а також від нестабільності напруги живлення.

На рис. 8.3, *б* наведена схема вимірювання переміщень, де реостатний перетворювач $R_п$ включений у мостову логометричну схему. Опори з'єднувальних дротів $R_{л_1}$ і $R_{л_2}$, разом з опорами R_x і R_3 включаються в сполучні плечі моста, тому при $R_1 = R_2$ й $R_x = R_3$, вплив опору з'єднувальних дротів, а також їхні температурні зміни взаємно компенсуються.

Крім розглянутих похибок схеми вимірювань, які наведені на рис. 8.1, мають місце також ще додаткові похибки первинних вимірювальних перетворювачів – реостатних перетворювачів, розглянутих в розд. 2.

На рис. 8.4 наведена схема перетворення переміщення в цифровий код з використанням аналого- цифрового перетворювача напруги в код (АЦП).



а *б*

Рис. 8.3. Схема вимірювання переміщень з включенням реостатного перетворювача:

а – у коло магнітоелектричного логометра; *б* – у мостову логометричну схему

Похибка вимірювання в даній схемі залежить від стабільності напруги $U_{оп}$. похибок АЦП, а також від співвідношення опорів $R_П/R_{вх}$,де $R_{вх}$ – вхідний опір АЦП.

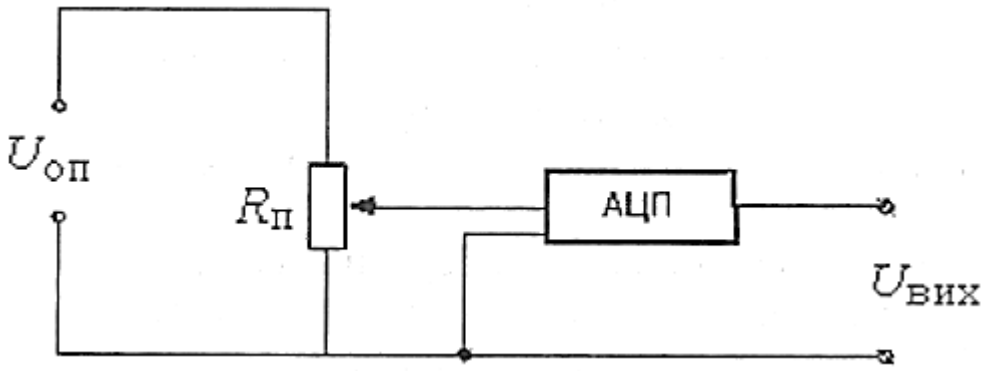


Рис. 8.4. Схема перетворення переміщення в цифровий код з використанням АЦП

8.3. Вимірювання лінійних та кутових переміщень з використанням індуктивних перетворювачів

На рис.8.5 зображена схема вимірювання переміщень, у якій в одно із плечей мостової схеми змінного струму включена обмотка одинарного індуктивного перетворювача, а в протилежне плече – змінна ємність С, шунтована опором R_3. Вимірюване лінійне переміщення ***x*** (або z) прикладене до рухливого феромагнітного якоря 1. Переміщення якоря по **z** призводить до зміни індуктивності обмотки й розбалансування моста. Відповідно буде змінюватися вихідна напруга в діагоналі моста пропорційно переміщенню якоря. Змінна ємність С – необхідна для підстроювання рівноваги моста у випадку початкового нульового положення якоря.

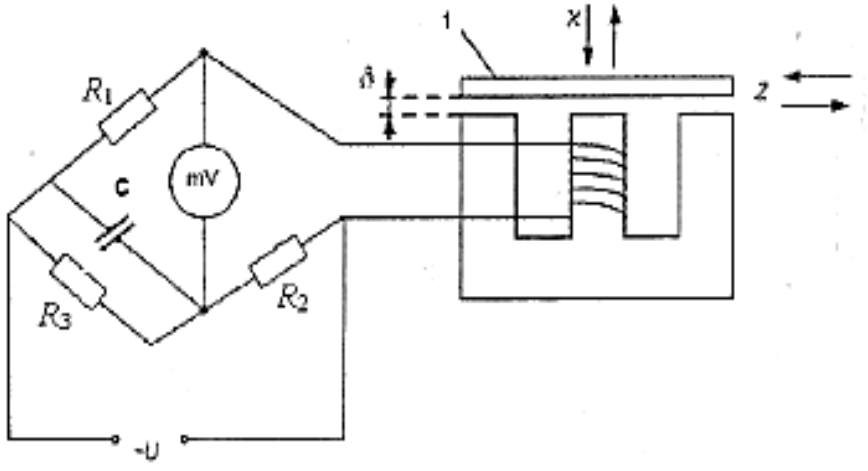


Рис. 8.5. Схема вимірювання переміщень з використанням одинарного індуктивного перетворювача

При переміщенні якоря в напрямку *x* змінюється повітряний проміжок δ, змінюється опір магнітного кола, що приводить до зміни індуктивності L

обмотки за гіперболічним законом і до нелінійної характеристики перетворення.

Лінійна ділянка характеристики одинарного індуктивного перетворювача становить (0.1...0.15) δ, а діапазон вимірюваних переміщень – від одиниць мікрометрів до декількох міліметрів.

Переміщення якоря в напрямку Z (рис. 8.5) змінює площу зазору S_δ в індуктивному перетворювачі. У цьому випадку спостерігається лінійна залежність індуктивності від переміщення. Діапазон вимірюваних переміщень збільшується до декількох сантиметрів.

Похибки розглянутої схеми обумовлені недоліками одинарних індуктивних перетворювачів, а також залежать від стабільності частоти і амплітуди живлячої напруги $\approx U$ і від температурних змін ємності С і опорів моста. Похибка перетворення переміщення в напругу становить 0.1... 1.5%.

Значного поліпшення лінійності характеристики перетворення й підвищення точності перетворення можна досягти, використовуючи первинні диференціальні індуктивні перетворювачі.

Основними схемами включення диференціальних перетворювачів є мостові схеми (рис. 8.6), де в загальному випадку $Z_1 = R_{\text{пр}} + jwL_1$ і $Z_2 = R_{\text{пр}} + jwL_2$ – повний опір обмоток диференціальних індуктивних перетворювачів.

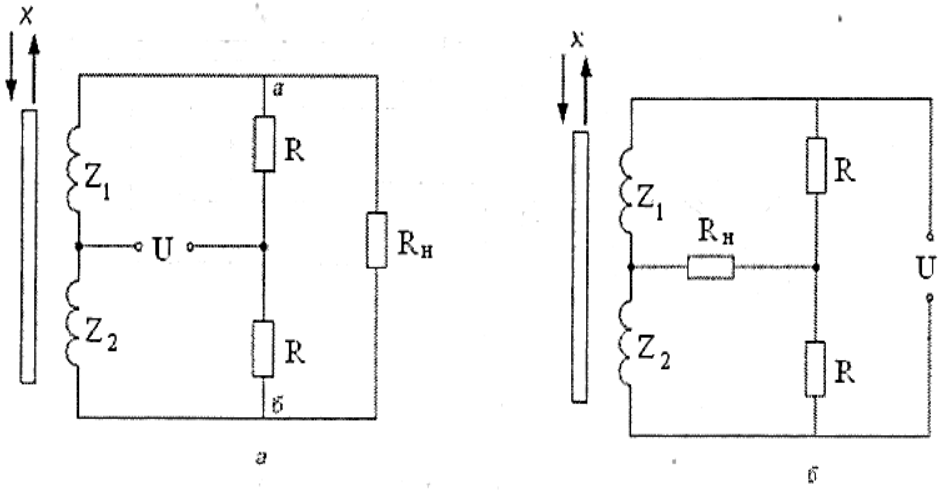


Рис. 8.6. Мостові схеми включення диференціальних перетворювачів

Джерело живлення U і навантаження $R_н$ можуть змінюватися місцями (рис. 8.6, *а, б*), при цьому чутливість моста також змінюється.

Вимірюване переміщення *x* прикладається до рухливого феромагнітного якоря. Якщо якір перебуває в середньому положенні (x = 0), то міст буде зрівноваженим, і напруга на вимірювальній діагоналі відсутня ($U_{вих}$ = 0). При цьому комплексні опори плечей $Z_1 = Z_2$ і їхнє значення візьмемо за Z_0.

При переміщенні якоря опір однієї обмотки зростає:

$$Z_1=Z_{0+}\Delta Z \qquad (8.7)$$

а опір другої обмотки зменшується:

$$Z_2=Z_0-\Delta Z_2 \qquad (8.8)$$

Зміни опорів $\Delta Z_1 = jwL_1$, і $\Delta Z_2 = jwL_2$, що відповідають переміщенню якоря щодо його середнього положення, у загальному випадку не рівні між собою через нелінійність функції перетворення. Однак, якщо переміщення мале, то розходження між ними – незначні, і можна вважати, що

$$\Delta Z_1 = Z_2 = \Delta Z_0 \tag{8.9}$$

Напруга на вимірювальній діагоналі (між точками *а* і *б*) у режимі холостого ходу (рис. 8.6, а), коли $R_{\text{Н}} = \infty$, дорівнює

$$U_{\text{вих.хх}} = \frac{U \cdot R}{Z_2 + R} - \frac{U \cdot R}{Z_1 + R} = \frac{U \cdot R(Z_1 - Z_2)}{(Z_2 + R)(Z_1 + R)} \tag{8.10}$$

Підставивши в (8.10) рівняння (8.7) і (8.8), одержимо

$$U_{\text{вих.хх}} = \frac{2U \cdot R\Delta Z_0}{(Z_2 + R)^2 + \Delta Z_0^2} \tag{8.11}$$

Через те, що $(Z_0 + R)^2 \gg \Delta Z_0^2$, то

$$U_{\text{вих.хх}} = \frac{2UR\Delta Z_0}{(Z_2 + R)^2} \tag{8.12}$$

Звідси випливає, що вихідна напруга $U_{\text{вих.хх}}$ залежить прямо пропорційно від зміни ΔZ_0, тобто від вимірюваного переміщення *x*.

Коли опір навантаження $R_{\text{н}}$ порівнянний з іншими опорами моста, то в цьому випадку

$$U_{\text{вих}} = \frac{2U \cdot R_{\text{Н}} \cdot \Delta Z_0 \cdot R}{(Z_0 + R)[2Z_0 R + R_{\text{Н}}(R + Z_0)]} \tag{8.13}$$

При зміні напрямку вимірюваного переміщення *x* змінюється знак ΔZ, що призводить до зміни знака напруги $U_{\text{вих}}$.

Підключення навантаження $R_{\text{н}}$ впливає на методичну похибку δU вимірювання $U_{\text{вих}}$.

$$\delta U = \frac{U_{\text{вих.хх}} - U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} \cdot 100\% \tag{8.14}$$

Підставляючи в (4.14) рівняння (4.12) і (4.13). одержимо

$$\delta U = \frac{2RZ_0}{(Z_0 + R) + R_{\text{Н}}} 100\% \tag{8.15}$$

Звідси випливає, що похибка δU буде тим меншою, чим більшим буде опір $R_{\text{н}}$.

Крім цього, на похибку перетворення переміщення *x* в напругу $U_{\text{вих}}$ впливають температурні зміни опорів R моста, а також змін активних опорів обмоток диференціального перетворювача. Застосування мостових схем зменшує ці похибки. Крім цього, зміна температури змінює магнітну проникність феромагнітного осердя, що призводить до появи додаткових похибок перетворення.

8.4. Вимірювання переміщень з використанням трансформаторних перетворювачів

Трансформаторні перетворювачі (первинні перетворювачі) розглянуті в розд. 2. Вимірюване переміщення x прикладається до рухливого феромагнітного якоря.

При зміні вимірюваного переміщення x змінюється повітряний проміжок δ у трансформаторному перетворювачі розд. 2, що призводить до зміни магнітного опору $R_м$ і взаємної індуктивності М.

При цьому змінюється вторинна ЕРС E_2.

Вторинна напруга трансформаторного перетворювача може бути вимірювана вольтметром змінного струму (рис. 8.7), шкала якого може бути проградуйована в одиницях переміщення.

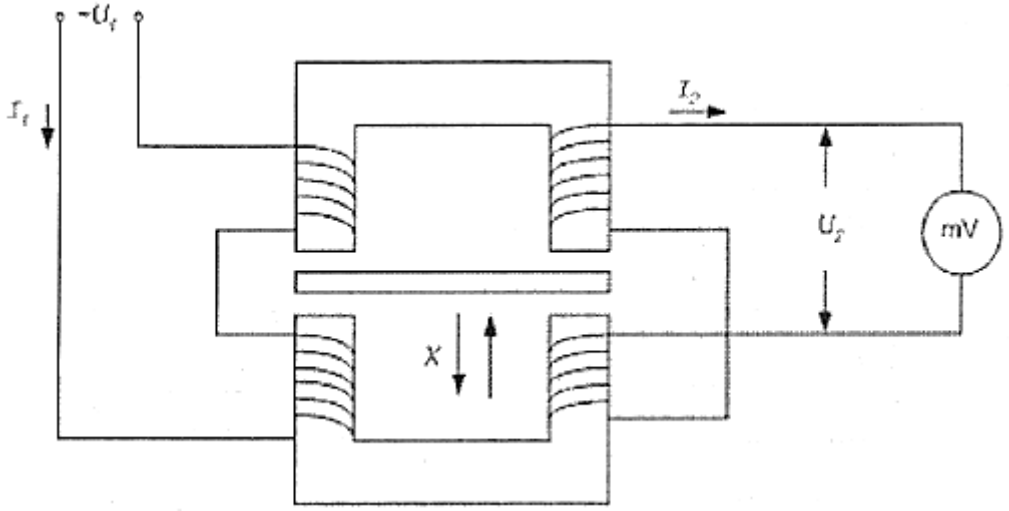


Рис. 8.7. Схема вимірювання переміщень з використанням трансформаторного перетворювача

Ця схема відрізняється простотою, але має порівняно великі похибки. Це пояснюється тим, що напруга U_2 і, отже, показання вольтметра, залежать від стабільності первинної напруги U_1. Крім того, напруга U_2 залежить від вихідного опору перетворювача $Z_{вих}$. Вихідна напруга

$$U_2 = E_2 - I_2 Z_{вих} \qquad (8.16)$$

де I_2 – струм, споживаний вольтметром; E_2 – вихідна ЕРС перетворювача.

Зі зміною температури, частоти живильної напруги U_1опір $Z_{вих}$ може змінюватися.

На похибку також впливають опори з'єднувальних дротів.

Значно менша похибка вимірювання переміщень x за допомогою первинного диференціального трансформаторного (взаємноіндуктивного) перетворювача може бути досягнута при використанні автоматичних компенсаторів.

На рис. 8.8 зображений первинний диференціальний трансформаторний перетворювач, вихідна напруга E_2 якого, пропорційна вимірюваному переміщенню, подається на вторинний перетворювач, що містить у собі підсилювач ЕП, феродинамічний перетворювач кута (ФП) і реверсивний двигун РД. Вал цього двигуна через редуктор пов'язаний з рухливою обмоткою феродинамічного перетворювача і з пристроями відліку, реєстрації та регулювання вимірюваної величини.

На вхід підсилювача подається різниця ЕРС первинного перетворювача E_2 і компенсуючого ЕРС $E_{2к}$. що знімається з виходу феродинамічного перетворювача. Вихідна напруга $E_{2к}$ залежить прямо пропорційно від кута повороту рухливої обмотки ФП.

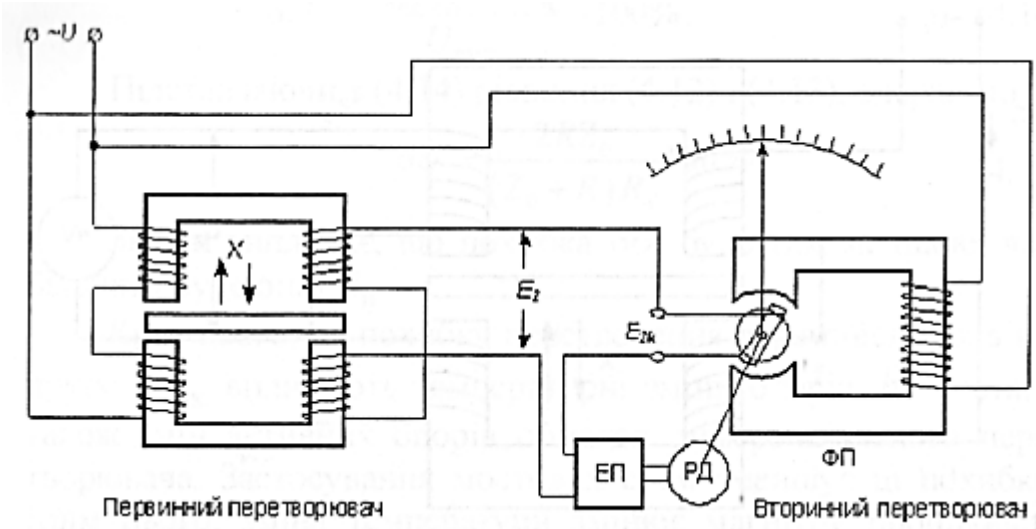


Рис.8.8 Схема вимірювання переміщень з використанням диференціального трансформаторного перетворювача

Якщо вимірювана ЕРС E_2 і компенсуюча ЕРС E_{2k} не дорівнюють одна одній за абсолютним значенням, тобто, якщо виникає розбаланс $E_р = E_2 - E_{2k}$, то підсилена за допомогою підсилювача напруга $E_р$ подається на реверсивний двигун і його ротор буде обертатись, змінюючи напругу $E_{2к}$.

Ротор, а разом з ним і покажчик приладу зупиняються, коли $E_2 = E_{2к}$. Після цього, за шкалою приладу, проградуйованого в значеннях вимірювального переміщення, можна встановити значення вимірюваної величини переміщення *x*.

Похибки вимірювання переміщення *x* за допомогою вимірювального ланцюга, наведеного на рис. 8.8, обумовлені похибками первинного трансформаторного перетворювача, а також похибками вторинного перетворювача ФП.

Автоматичний компенсатор (рис. 8.8) має порівняно невелику похибку. Клас точності приладів цього типу не гірше 0,5.

Значного використання у вимірювальній техніці набули трансформаторні перетворювачі другої групи, тобто з рухливими обмотками, і зокрема обертові трансформатори та сельсини. Ці трансформаторні перетворювачі використовуються для вимірювання кутових переміщень і виконуються у вигляді електричних машин, у яких первинна обмотка розташовується на статорі, а вторинна – на роторі.

Обертові трансформатори зазвичай мають по дві взаємно перпендикулярні обмотки на роторі та статорі і призначені для роботи в одному із двох режимів: режимі синусно-косинусного обертового трансформатора (СКОТ) і режимі лінійного обертового трансформатора (ЛОТ). Схема перетворювача в режимі СКОТ зображена на рис. 8.9.

При подачі на одну з обмоток статора напруги живлення $U_ж$ з обмоток ротора, розгорнутого щодо статора на кут α, знімаються вихідні напруги

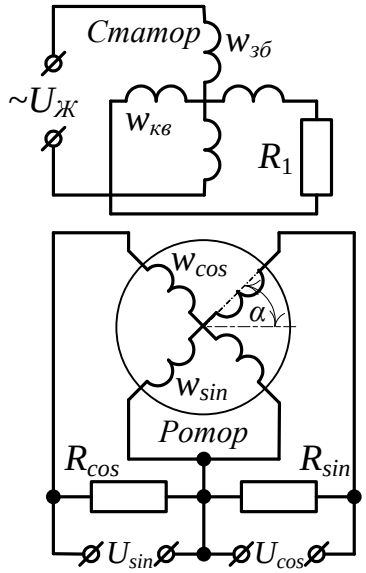


Рис. 8.9. Схема перетворювача в режимі синусно-косинусного обертового трансформатора

$$U_{ВИХ.2} = kU_Ж \sin\alpha\,, \tag{8.17}$$

$$U_{ВИХ.3} = kU_Ж \cos\alpha\,, \tag{8.18}$$

де коефіцієнт пропорційності k залежить від співвідношення витків $w_2/w_1 = w_3/w_1$ і при виконанні симметрирования не залежить від кута повороту α (зазвичай $w_2 = w_3$).

де w_1, w_2 – відповідно число витків у кожній з обмоток статора й ротора.

Опір R_1, $R\cos\alpha$, $R\sin\alpha$ вибирають так, щоб струм , в обмотці живлення залишався постійним для будь-якого кута α.

Схема перетворювача в режимі ЛОТ зображена на рис. 8.10.

Залежність вихідної напруги $U_{ВИХ}$ від кута повороту ротора α має вигляд:

$$U_{ВИХ} = U_Ж \frac{k\sin\alpha}{1+k\cos\alpha}\,. \tag{8.19}$$

Для малих кутів α можна прийняти $\sin\alpha \approx \alpha$, $a\ \cos\alpha = 1$, і залежність $U_{ВИХ} = f(\alpha)$ набирає вигляду:

$$U_{ВИХ} = U_Ж \frac{k}{1+k}\alpha\,, \tag{8.20}$$

тобто вихідна напруга $U_{ВИХ}$ має лінійну залежність від кута α, однак ця лінійність зберігається з точністю до 0,75 % у межах зміни кута α від +60°до -60°, що є значним недоліком розглянутої схеми і обмежує її використання.

Відносна приведена похибка ЛОТ при відповідному виборі обмотувальних даних в діапазоні кутів α до 50° може не перевищувати 0,05 %.

Синусо-косинусні обертові трансформатори розрізняють за класами точності. Для найбільш високого класу точності припустима похибка становить величину порядку однієї кутової хвилини.

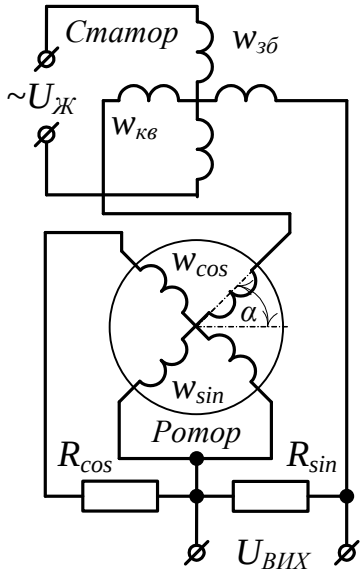


Рис. 8.10. Схема перетворювача в режимі лінійного обертового трансформатора

Похибки перетворення кутових переміщень α можуть виникнути внаслідок неправильного підбору опорів у схемі, нестабільності напруги і частоти живлення, спотворення форми синусоїди, впливу зміни робочої температури перетворювача. Через неправильний підбір опорів відбувається спотворення магнітного потоку обертового трансформатора. Це викликано тим, що струми в обмотках ротора створюють магнітні потоки, спрямовані уздовж магнітних осей обмоток. Підсумовування цих потоків з магнітним потоком збудження приводить до спотворення вихідного сигналу.

Різновидом обертових трансформаторів є сельсини, які мають три обмотки на статорі, розташовані під кутом 120° одна до одної, і одну обмотку на роторі.

Обмотки статора живляться трифазною напругою, обмотка ротора - однофазною.

Для вимірювання кутових переміщень застосовується включення сельсинів у трансформаторному режимі (рис. 8.11)

Напруга живлення подається на роторну обмотку сельсина - давача , статорні обмотки якого з'єднані зі статорними обмотками сельсина-приймача

Результуючий магнітний потік сельсина-приймача, створений струмами, що протікають в обмотках статора, індукує в обмотці ротора ЕРС, яка залежить від його кутового положення. Величина напруги на виході сельсина залежить від різниці кутів між роторами сельсина-приймача та сельсина давача. Амплітуда вихідної напруги

$$U_{ВИХ} = U_{MAX}\cos\Delta\alpha. \qquad (8.21)$$

Оскільки нульовий відлік відповідає зсуву роторів СД і СП на 90°, то

$$U_{ВИХ} = U_{MAX}\cos(\Delta\alpha + 90°) = U_{MAX}\sin\Delta\alpha. \qquad (8.22)$$

де U_{MAX} − амплітуда напруги живлення;

$$\Delta\alpha = \frac{\pi}{2} - (\alpha_Д - \alpha_П) \qquad (8.23)$$

де, $\alpha_Д$ і $\alpha_П$ кути повороту роторів сельсинів давача й приймача.

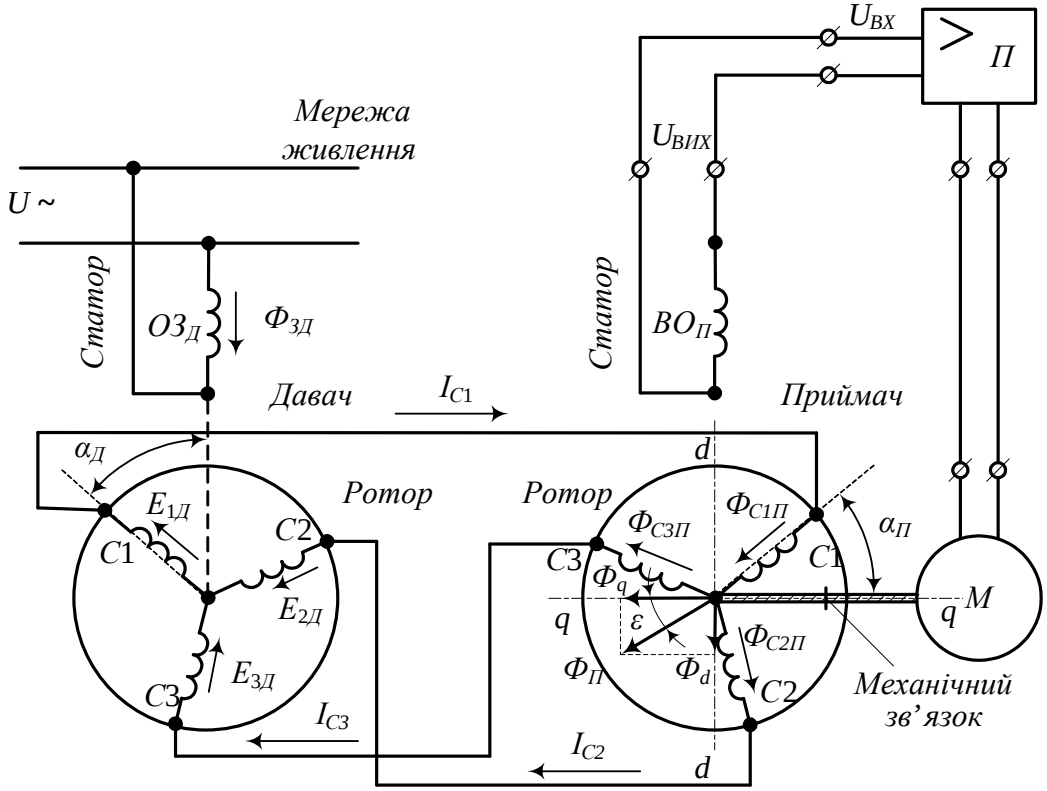


Рис.8.11 Схема включення сельсинів у трансформаторному режимі

Зазвичай у початковому стані ротор сельсина-приймача повернут на кут $\frac{\pi}{2}$ відносно ротора сельсина-давача. У цьому випадку вихідна напруга буде визначатися величиною кута неузгодженості $\Delta\alpha$.

Сельсини можуть бути використані в трансформаторному режимі як пристрої, що вимірюють різницю кутових переміщень. При цьому діапазон вимірювання не перевищує 30°, а похибка нелінійності становить ±2%, що визначає порівняно невисоку точність цих перетворювачів.

8.5. Вимірювання переміщень з використанням ємнісних перетворювачів

Ємнісні первинні перетворювачі (розд. 2) в багатьох випадках є складовою частиною більш складних електронних пристроїв, вихідні сигнали яких змінюються внаслідок зміни ємності перетворювача під дією контрольованих параметрів (в окремому випадку переміщень).

Відповідно до схеми включення ємнісних перетворювачів можна виділити три групи пристроїв. До першої групи належать пристрої, у яких ємнісні перетворювачі використовуються як елементи резонансних ланцюгів. Зміна ємності перетворювача під дією вимірюваного переміщення в таких пристроях супроводжується зміною амплітуди вихідних сигналів.

Реєструючи ці зміни, контролюють величину параметра, що діє на ємнісний перетворювач.

До другої групи належать пристрої, у яких ємнісний перетворювач використовується як елемент подільника напруг. Зміна повного опору ємнісного перетворювача під дією вимірюваного переміщення супроводжується зміною напруги на виході подільника. Реєструючи ці зміни, контролюють величину параметра, що діє на ємнісний перетворювач.

До третьої групи належать пристрої, в яких для включення ємнісного перетворювача використовується мостова схема.

На рис. 8.12, *а* зображено резонансне коло, що використовується для включення ємнісного перетворювача.

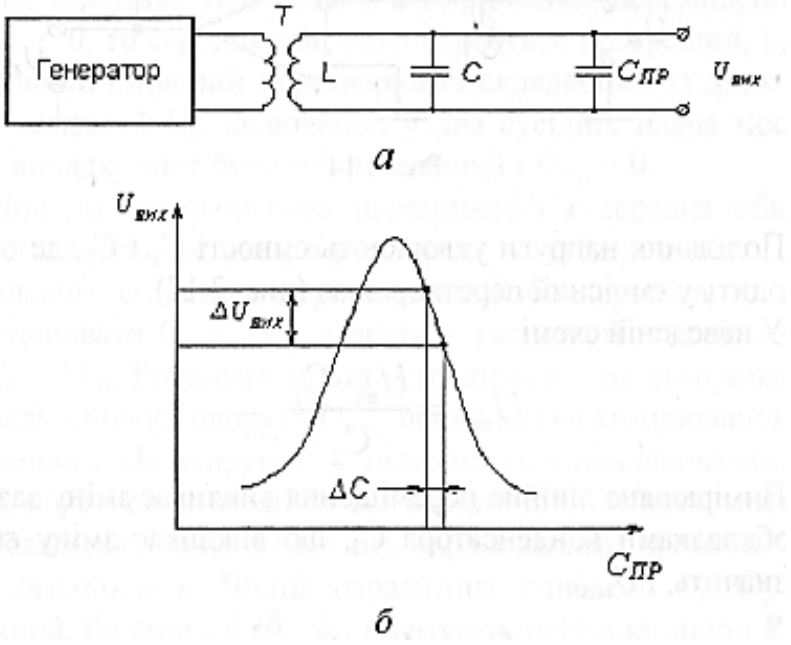


Рис. 8.12. Схема резонансного кола, що використовується для включення ємнісного перетворювача (*а*), та графік резонансній кривій (*б*)

Генератор через розділовий трансформатор T живить резонансний LC - контур. Ємність контуру складається з ємності перетворювача $C_{\text{пр}}$ і конденсатора для підстроювання ємністю C.

Частота і значення напруги генератора - постійні.

Вимірюване переміщення змінює ємність $C_{\text{пр}}$, що призводить до зміни напруги U на контурі по резонансній кривій, як показано на рис. 8.12, *б*. При зміні ємності перетворювача на ΔC напруга на контурі змінюється на ΔU. Підстроювальний конденсатор призначений для настроювання контуру так, щоб чутливість вимірювального ланцюга

$$K = \frac{\Delta U}{\Delta C}, \tag{8.24}$$

була максимальною. На рис. 8.13 зображена схема вимірювального кола ємнісного перетворювача, побудованого за принципом подільника напруги.

Подільник напруги утворюють ємності C_1 і C_2, де ємність C_2 входить у ємнісний перетворювач розд. 2.

У наведеній схемі

$$U_{вих} = \frac{U_{вх} \cdot C_1}{C_2}. \qquad (8.25)$$

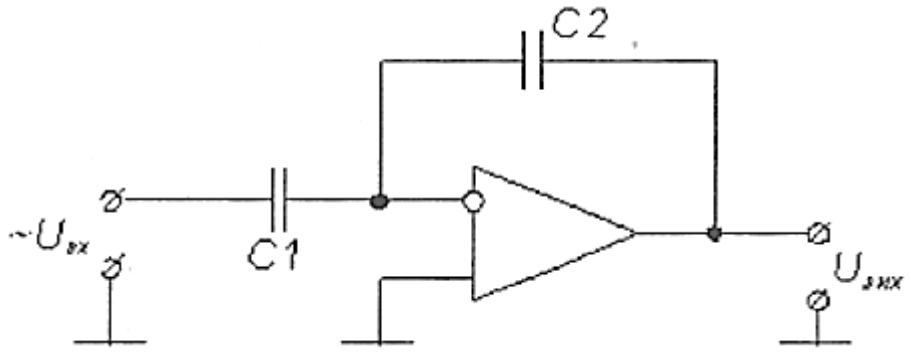


Рис.8.13 Схема вимірювального кола ємнісного перетворювача, побудованого за принципом подільника напруги

Вимірюване лінійне переміщення викликає зміну зазору δ_2 між обкладками конденсатора C_2, що викликає зміну ємності C_2, а значить, і $U_{вих}$

$$U_{вих} = U_{вх} \cdot C_1 \frac{\delta_2}{\xi \cdot S_2}, \qquad (8.26)$$

де ξ - діелектрична проникність середовища, що знаходиться між обкладками конденсатора C_2; S_2 - площа обкладок конденсатора C_2.

Диференціальні ємнісні перетворювачі вмикають в мостові вимірювальні кола (рис. 8.14)

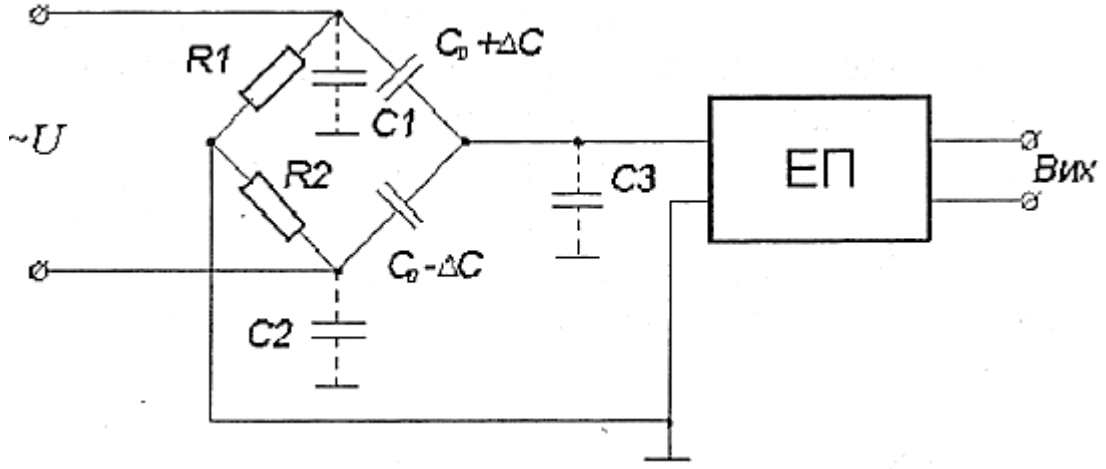


Рис. 8.14 Схема вимірювального кола диференціального ємнісного перетворювача, побудованого за принципом мостового вимірювального кола

У даній схемі C_0 - диференціальний ємнісний перетворювач, що має три обкладки, які утворюють два конденсатори. Середня обкладка пов'язана з вимірюваним переміщенням x. Якщо x = 0, то середня обкладка перебуває посередині, і диференціальний ємнісний перетворювач складається із двох однакових ємностей C_0, включених у два сусідніх плеча моста. У цьому випадку міст буде зрівноважений і $U_{вих}$= 0.

При дії вимірюваного переміщення x середня обкладка зміщується від середини, в результаті чого одна ємність диференціального ємнісного перетворювача збільшується, тобто буде дорівнювати $C_0 + \Delta C_0$, а друга -

зменшується, тобто дорівнює C_0 - ΔC_0. Рівновага моста порушиться, і на вимірювальній діагоналі виникне напруга $U_{вих}$, пропорційна вимірюваному переміщенню x. Ця напруга $U_{вих}$ підсилюється підсилювачем ЕП.

Для усунення похибок від впливу лінії зв'язку, елементи вимірювального кола з'єднують екранованими дротами, а сам екран заземлюють. Вплив паразитних ємностей C_1, C_2, C_3 - незначний, бо ємності C_1 і C_2 шунтують невеликі опори R_1 і R_2, а ємність C_3 - індикаторна діагональ.

Похибки вимірювання переміщень за допомогою ємнісних перетворювачів викликані температурними змінами ємності. Це виникло внаслідок зміни відстані між обкладками конденсатора при зміні температури.

Крім цього, на похибки вимірювань впливають паразитні ємності з'єднувальних дротів, тобто результати вимірів залежать від зміни параметрів з'єднувальних дротів. Чим довші з'єднувальні дроти, тим більша похибка перетворення.

До недоліків ємнісних перетворювачів слід віднести їхню малу ємність (до сотень пікофарад) і великий внутрішній опір, що залежить від частоти живильної напруги.

Всі розглянуті ємнісні перетворювачі можуть бути використані для вимірювання не тільки лінійних, а також й кутових переміщень. Для цього в перетворювачах необхідно використовувати конденсатори, призначені для вимірювання кутових переміщень.

8.6. Магнітострикційні перетворювачі переміщень

На основі аналізу роботи первинних вимірювальних перетворювачів - реостатних, індуктивних, ємнісних - можна зробити висновок, що вони мають ряд суттєвих недоліків.

Наприклад:

наявність у реостатному перетворювачі тертьових рухливих контактів, що може призвести до великих похибок перетворення;

нелінійність характеристик перетворення в реостатних, індуктивних і ємнісних перетворювачах;

малий діапазон вимірюваних переміщень (до декількох сантиметрів);

вплив температури на похибки перетворення;

необхідність використання проміжних перетворень при вимірюванні переміщень.

Наприклад, в індуктивних датчиках переміщення перетворюється в індуктивність, яка у свою чергу потім перетворюється в напругу.

Ці проміжні перетворення призводять до додаткових похибок.

Всі ці недоліки відсутні в магнітострикційних перетворювачах переміщення.

Магнітострикційні перетворювачі переміщення дозволяють перетворювати кутові або лінійні переміщення в один із зручних для подальшого використання видів вихідних сигналів: у часовий інтервал,

частоту або цифровий код. Діапазон вимірюваних переміщень може бути в межах від одиниць міліметрів до декількох метрів.

Загальні поняття магнітострикції. ***Магнітострикцію*** можна визначити як явище зміни розмірів і форми феромагнітного тіла при намагнічуванні.

Якщо феромагнітний стержень розмістити в поздовжньому магнітному полі, він подовжується або коротшає залежно від матеріалу стержня, тобто в стержні відбувається магнітострикційна деформація. Класичними представниками магнітострикційних матеріалів є нікель і пермалой, що мають приблизно однакові за абсолютною величиною, але протилежні за знаком ефекти: нікель у поздовжньому магнітному полі коротшає, а пермалой подовжується. Відносна зміна довжини стержня $\frac{\Delta l}{l}$ з магнітострикційного матеріалу, залежно від прикладеного магнітного поля, визначається багатьма факторами: його кристалічною структурою, чистотою матеріалу, технологією термічної і холодної обробки. Процеси виникнення магнітострикційних деформацій при впливі зовнішніх магнітних полів узгоджуються особливостями феромагнетиків.

Як відомо, феромагнетик при температурі нижче точки Кюрі складається з безлічі областей самочинного намагнічення, що називаються доменами. Кожен домен має форму еліпсоїда, і самочинно намагнічений до насичення I_s

Вектор намагніченості I_s еліпсоїда спрямований вздовж його осі. При відсутності зовнішніх магнітних полів всі домени розташовуються так, щоб їхні вектори намагніченості I_s становили у феромагнетику замкнуті кола, і щоб в цілому феромагнетик був розмагнічений. Таким чином, при відсутності зовнішніх магнітних полів всі еліпсоїди (домени) будуть повернуті в різні напрямки. Зовнішнє магнітне поле H, не паралельне вектору I_s змушує всі еліпсоїди повернутися в одному напрямку, тобто в напрямку наближення їхніх векторів I_s до поля H. Це призводить до зміни лінійних розмірів феромагнетика без зміни його об'єму, тобто призводить до виникнення магнітострикційної деформації. Процеси повороту доменів у напрямку зовнішнього магнітного поля H носять зворотний характер, тому після зняття цього поля H, всі еліпсоїди самочинно повертаються в попередні напрямки й магнітострикційна деформація зникає.

Якщо зовнішнє магнітне поле буде у вигляді імпульсу, то у феромагнетику виникає імпульс магнітострикційної деформації, тобто виникає ультразвуковий імпульс.

Прямий ефект магнітострикції полягає в перетворенні вхідного електричного імпульсу в ультразвуковий імпульс, що виникає в магнітострикційному матеріалі, який називається звукопроводом.

Дане пряме перетворення здійснюється за допомогою вхідного магнітострикційного перетворювача.

У найпростішому вигляді вхідний магнітострикційний перетворювач складається з котушки 1, надітої на звукопровід 2 і постійного магніту 3,

необхідного для початкового постійного магнітного зсуву у звукопроводі в зоні його прямого перетворення (рис. 8.15,*а*).

При протіканні імпульсу струму через котушку вхідного магнітострикційного перетворювача в звукопроводі у зоні прямого перетворення виникає імпульс магнітного поля, що збуджує в звукопроводі ультразвуковий імпульс.

Цей ультразвуковий імпульс поширюється по звукопроводу зі швидкістю звуку.

Зворотний ефект магнітострикції полягає в перетворенні ультразвукового імпульсу, що досяг зони зворотного перетворення, у вихідний електричний імпульс.

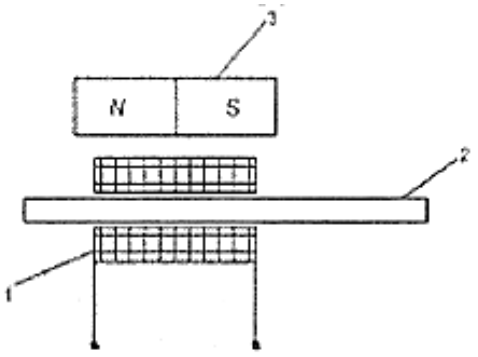
Зворотне перетворення здійснюється за допомогою вихідного магнітострикційного перетворювача.

Вихідний і вхідний магнітострикційні перетворювачі зазвичай виконують однаковими, а найпростіші - у вигляді котушки і постійного магніту (рис. 8.15. *а*).

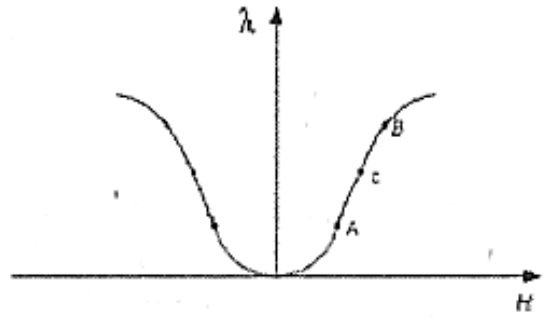
Зворотний ефект магнітострикції пояснюється тим, що ультразвуковий імпульс здійснює обертання еліпсоїдів (доменів) у звукопроводі в зоні зворотного перетворення, а обертання векторів намагніченості доменів індукує у котушці вихідного магнітострикційного перетворювача електричний імпульс.

Вихідний і вхідний магнітострикційні перетворювачі розташовані на звукопроводі і один з них є нерухомим, а другий пов'язаний з об'єктом, що переміщується, тобто може пересуватися вздовж звукопроводу.

На рис. 8.15, *б* зображена залежність поздовжньої магнітострикції λ феромагнітного матеріалу від напруженості поля *H,* звідки видно, що магнітострикційний ефект у загальному випадку є парним і нелінійним. Однак на ділянці *AB* цієї кривої спостерігається досить гарна лінійна залежність між магнітострикцією і напруженістю поля.



а



б

Рис. 8.15 Наведені:

а - найпростіший магнітострикційний перетворювач: 1 - котушка, 2 - звукопровід, 3 - постійний магніт. *б* - графік залежності поздовжньої магнітострикції λ феромагнітного матеріалу від напруженості поля *H*

У багатьох практичних випадках потрібно, щоб перетворювачі працювали в лінійному режимі. Забезпечення даного лінійного режиму здійснюється за допомогою початкового постійного магнітного зсуву, створюваного постійним магнітом, що переводить робочу точку *C* на лінійну область кривої статичної магнітострикції (тобто в середині відрізка *AB).* Положення робочої точки *C* на ділянці *AB* вибирається залежно від величини напруженості поля *H.* створюваного вхідним струмом. Крім того, положення постійного магнітного поля зміщення збільшує вихідний електричний сигнал, тому що лінійна область *AB* має найбільшу крутість. Надалі ми розглядатимемо тільки вхідні і вихідні магнітострикційні перетворювачі, що мають постійний магнітний зсув за допомогою постійних магнітів.

Вхідний магнітострикційний перетворювач може також мати конструкцію, зображену на рис. 8.16, де біля звукопроводу 1 розташоване феритове тороїдальне осердя 2 із зазором і постійний магніт 3. На осерді знаходиться обмотка 4, на яку подається вхідний електричний імпульс. В зазорі осердя виникає електромагнітне поле, яке замикається через звукопровід у зоні його прямого перетворення і збуджує там ультразвуковий імпульс. Тривалість цього ультразвукового імпульсу визначається шириною зазору феритового осердя.

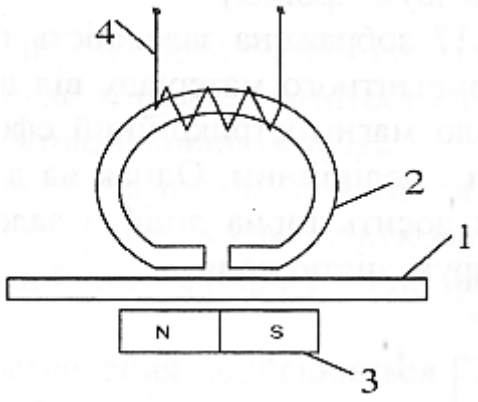


Рис. 8.16 Конструкція магнітострикційного перетворювача:

1 - звукопровід, 2 - феритове тороїдальне осердя, 3 - постійний магніт, 4 - обмотка

Таку ж конструкцію може мати і вихідний магнітострикційний перетворювач. Достойність такої конструкції магнітострикційних перетворювачів полягає у тому, що вони знімні і можуть використовуватися спільно зі звукопроводом, що має різну геометрію його перетину і виконаний у вигляді кільця. Зв'язок магнітострикційних перетворювачів зі звукопроводом здійснюється через повітряний зазор за допомогою електромагнітного поля, тому плівки і оксиди на поверхні звукопроводу не впливають на роботу перетворювача.

Звукопровід складається з магнітострикційного матеріалу і може бути виконаний у вигляді стрічки, трубки, дроту із круглим поперечним перерізом, з магнітодіелектрика необхідної форми.

Фізичною основою роботи магнітострикційних перетворювачів переміщення (МПП) є перетворення за допомогою прямого ефекту магнітострикції вхідного електричного імпульсу в ультразвуковий імпульс і використання кінцевого часу його поширення в пружному матеріалі, що називається звукопроводом. Ультразвуковий імпульс, поширюючись по звукопроводу зі швидкістю звуку, досягає вихідного магнітострикційного перетворювача, де, внаслідок зворотного ефекту магнітострикції, він перетворюється в електричний імпульс, що відстає від вхідного імпульсу на час затримки:

$$t_{зат} = \frac{l_з}{V_з}\ , \qquad (8.27)$$

де $l_З$– довжина звукопроводу між вхідним і вихідним магнітострикційними перетворювачами; $V_З$ – швидкість поширення звукового імпульсу у звукопроводі.

Оскільки один з магнітострикційних перетворювачів (вхідний або вихідний) жорстко пов'язаний з об'єктом, що переміщується, а другий - нерухомий, одержуваний час $t_{зат}$ змінюється прямо пропорційно вимірюваному переміщенню.

Магнітострикційні перетворювачі переміщення в часовий інтервал

На рис. 8.17 наведено структурну схему магнітострикційного перетворювача кутового переміщення в часовий інтервал.

Перетворювач містить звукопровід 1 у вигляді кільцевої петлі, виконаний з магнітострикційного матеріалу (наприклад, нікелевого дроту із круглим поперечним перерізом). Кінці звукопроводу поза кільцем для усунення відбитків затиснуті глушниками 2 і 3. У центрі кільцевої петлі звукопроводу встановлений вхідний вал 4, кут повороту θ якого необхідно виміряти. До цього вала жорстко закріплений вихідний магнітострикційний перетворювач 5, вихідна напруга якого подається на підсилювач зчитування 6. Вхідний магнітострикційний перетворювач 7 встановлений на звукопроводі у точці, що відповідає нульовому значенню кута повороту вала.

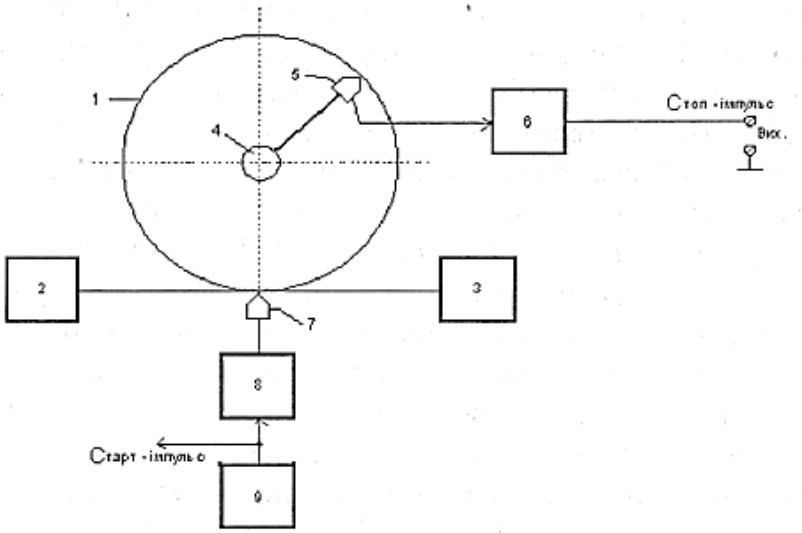


Рис. 8.17 Структурна схема магнітострикційного перетворювача кутового переміщення в часовий інтервал:

1 – звукопровід, 2 ,3 – глушники, 4 – вхідний вал, 5 – вихідний МПП, 6 – підсилювач зчитування, 7 – вхідний МПП, 8 – підсилювач запису, 9 – генератор циклів

Перетворення кута повороту вала в часовий інтервал відбувається так.

При подачі старт-імпульсу з генератора циклів 9 на підсилювач запису 8 через обмотку вхідного магнітострикційного перетворювача протікає імпульс струму. У звукопроводі в зоні його прямого перетворення внаслідок прямого ефекту магнітострикції, виникає імпульс подовжньої механічної напруги (ультразвуковий імпульс). Цей імпульс поширюється по звукопроводу зі швидкістю звуку від вхідного магнітострикційного перетворювача 7 (тобто від нульової точки відліку кута повороту вала) до зони зворотного перетворення перетворювача 5, який жорстко зв'язаний з валом 4 і переміщується уздовж звукопроводу при повороті вала. Під дією цього ультразвукового імпульсу, внаслідок зворотного ефекту магнітострикції, в обмотці вихідного магнітострикційного перетворювача 5 виникає електричний сигнал, що підсилюється і формується в імпульс (стоп-імпульс) підсилювачем зчитування 6. Стоп-імпульс буде затриманий відносно старт-імпульсу на час $t_{зат,}$ обумовлений (8.27). Таким чином у даному перетворювачі здійснюється перетворення кута повороту вала θ у часовий інтервал $t_{зат.}$ Рівняння (8.27) залишається правильним тільки у випадку, якщо величина швидкості обертання вала наближається до нуля, а навколишня температура – постійна.

Якщо кутова швидкість вала, а отже, і лінійна швидкість переміщення $V_{П}$ вихідного магнітострикційного перетворювача 5 уздовж звукопроводу 1 (рис. 8.17) буде більша нуля, а навколишня температура зміниться на ΔT^{o}, то час затримки зміниться і буде дорівнювати t_{U1}. За цей час вихідний перетворювач 5 переміститься по звукопроводу на відстань

$$\Delta l_{З} = t_{U1} \cdot V_{П}, \qquad (8.28)$$

що у свою чергу викликає зміну часу затримки на величину

$$\Delta t_{\text{зат.п}} = \frac{\Delta l_3}{V_3} = t_{U_1} \cdot \frac{V_\text{п}}{V_3} \tag{8.29}$$

Зміна навколишньої температури на ΔТ° щодо номінальної викликає додаткову зміну часу затримки на величину

$$\Delta t_{\text{зат.т}} = t_{\text{U1}} \cdot \gamma \cdot \Delta T°, \tag{8.30}$$

де γ – температурний коефіцієнт затримки звукопроводу.

Зміна затримок $\Delta t_{\text{зат.т}}$ *і* $\Delta t_{\text{зат.п}}$ викликає збільшення похибки вимірювання кута повороту.

Таким чином, з урахуванням впливу швидкості переміщення перетворювача 5 і зміни навколишньої температури в пристрої (рис. 8.17) у кожному циклі перетворення кут повороту вала перетвориться в часовий інтервал:

$$t_{\text{U1}} = t_{\text{зат.}} + \Delta t_{\text{зат.п}} + \Delta t_{\text{зат.т}}, \tag{8.31}$$

або

$$t_{U1} = t_{\text{зат.}} + \Delta t_{\text{ПТ}}, \tag{8.32}$$

де $t_{\text{зат}}$ – дійсне значення, що відповідає миттєвому значенню кута повороту на початку циклу перетворення при номінальній навколишній температурі:

$$\Delta t_{\text{пт}} = \Delta t_{\text{ зат.п}} + \Delta t_{\text{зат.т}}, \tag{8.33}$$

де $\Delta t_{\text{пт}}$ – абсолютна похибка вимірювання, накопичена за час перетворення t_{U1} в кожному циклі перетворення через вплив швидкості переміщення $V_\text{п}$ і зміни температури на $\Delta T°$ відносно номінальній.

Підставляючи в (8.31) рівняння (8.29) і (8.30), одержимо

$$t_{U_1} = t_{\text{зат}} \frac{1}{1-Q}, \tag{8.34}$$

де коефіцієнт

$$Q = \frac{V_n}{V_3} + \gamma \Delta T°. \tag{8.35}$$

З рівнянь (8.27), (8.34), (8.35) випливає, що

$$t_{U_1} = \frac{l_3}{V_3(1-\gamma \Delta T°) - V_\text{п}}, \tag{8.36}$$

де $l_\text{з}$ – довжина звукопроводу між вхідним і вихідним магнітострикційним перетворювачами, що відповідає моменту часу початку вимірювання в кожному циклі.

Абсолютна похибка перетворення кута повороту вала в часовий інтервал у кожному циклі перетворення дорівнює (8.33) або

$$\Delta t_{\text{пт}} = t_{\text{U1}} - t_{\text{зат.}}, \tag{8.37}$$

Для всіх металевих звукопроводів швидкість поширення подовжніх коливань (швидкість звуку) при номінальній температурі

$$V_3 = 5 \cdot 10^3 \text{ м/сек.}$$

Температурний коефіцієнт затримки (ТКЗ) звукопроводу визначається виразом

$$\gamma = \frac{\Delta t\text{зат}}{\Delta t\text{зат} \cdot \Delta T°} \tag{8.38}$$

Швидкість звуку в звукопроводі

$$V_З = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{8.39}$$

де E – модуль пружності матеріалу звукопроводу; ρ – щільність матеріалу звукопроводу.

Як випливає з (8.38) і (8.39) ТКЗ обумовлений температурною аномалією модуля пружності матеріалу звукопроводу і температурним коефіцієнтом лінійного розширення матеріалу звукопроводу, тобто при зміні температури змінюється швидкість звуку $V_З$ і змінюється довжина звукопроводу $l_з$, що призводить до зміни $t_{зат}$ на величину $\Delta t_{зат.т}$ (8.30).

Для зменшення впливу температури на похибку перетворення необхідно використовувати звукопроводи, виконані з матеріалів, що мають мінімальне значення температурного коефіцієнта затримки γ. До таких матеріалів належать сплави типу елінвар, у яких $\gamma \approx 10 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

Основою цих сплавів є нікель і залізо. До недоліків цих сплавів слід віднести невеликий (у порівнянні з нікелем) коефіцієнт магнітострікції.

На рис. 8.18 наведений магнітострикційний перетворювач лінійних переміщень у часовий інтервал. У ньому використовується лінійний звукопровід 1, кінці якого для усунення відображень ультразвукових коливань затиснуті глушниками 2 і 3. Імпульс (старт-імпульс) з виходу генератора циклів 4 підсилюється підсилювачем запису 5 і надходить на обмотку вхідного магнітострикційного перетворювача 6.

Під дією цього імпульсу в звукопроводі у зоні його прямого перетворення, внаслідок прямого ефекту магнітострикції, виникає ультразвуковий імпульс, що поширюється по звукопроводу зі швидкістю звуку $V_З$ в обидва боки від вхідного магнітострикційного перетворювача 6. Один з цих ультразвукових імпульсів гаситься глушником 2, а другий через час надходить у зону зворотного перетворення вихідного магнітострикційного перетворювача 7.

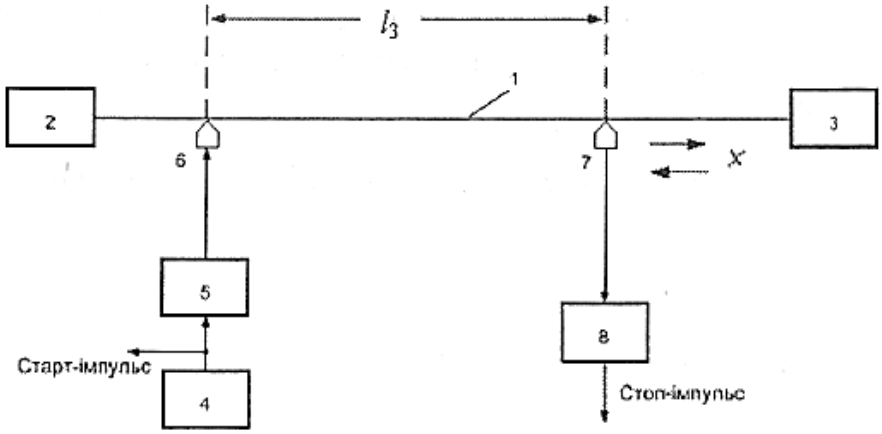


Рис. 8.18. Структурна схема магнітострикційного перетворювача лінійних переміщень в часовий інтервал:

1 – лінійний звукопровід, 2 ,3 – глушники, 4 – генератор циклів,
5 – підсилювач запису, 6 – вхідний МПП, 7 – вихідний МПП,
8 – підсилювач зчитування

Цей ультразвуковий імпульс унаслідок зворотного ефекту магнітострикції перетворюється в перетворювачі 7 у електричний сигнал, який потім підсилюється і формується в імпульс (стоп-імпульс) підсилювачем зчитування 8. Після цього цей ультразвуковий імпульс гаситься глушником 3. Один з магнітострикційних перетворювачів 7 (або 6) зв'язаний з вимірюваним переміщенням x і може вільно переміщуватися уздовж звукопроводу.

Таким чином, після надходження кожного імпульсу циклу з виходу генератора 4 здійснюється перетворення лінійного переміщення в часовий інтервал між старт і стоп-імпульсами. Цей часовий інтервал $t_{зат}$ (8.27) (при нульовій швидкості переміщення об'єкта і при номінальній робочій температурі) або t_{U1} (8.36), якщо швидкість переміщення $V_n > 0$ і навколишня температура зміниться на $\Delta T°$ щодо номінальної.

Зображені на рис. 8.17 і 8.18 МПП відрізняються тільки формою звукопроводу, а їхні принципи дій вважаються однаковими. Тому залишаються загальними для них усі наведені вище аналізи похибок. В обох розглянутих МПП у звукопроводах використовуються поздовжні ультразвукові хвилі, швидкість поширення яких дорівнює $V_З = 5 \cdot 10^3$ м/с.

Для збільшення чутливості вимірювання використовується спосіб, реалізований у МПП (рис.8.19). У даному пристрої використовується звукопровід 1, у якого один кінець затиснутий глушником, а другий його кінець є вільним. Старт-імпульс із виходу генератора циклів 3 підсилюється підсилювачем запису 4 і надходить на вхідний магнітострикційний перетворювач 5. При цьому комутатор 6 на час дії старт-імпульсу – закритий. У звукопроводі в зоні прямого перетворення виникає ультразвуковий імпульс, що поширюється по звукопроводу, і при досягненні його вільного кінця цілком від нього відбивається і починає рухатися в зворотному напрямку. При досягненні відбитого ультразвукового імпульсу магнітострикційного перетворювача 5 у ньому збуджується електричний імпульс, що проходить через комутатор і підсилюється підсилювачем 7 (стоп-імпульс).

Стоп-імпульс буде затриманий щодо старт-імпульсу на час затримки при номінальній температурі і $V_п = 0$

$$t_{зат} = \frac{2l_З}{V_З} \qquad (8.40)$$

де $l_З$ – довжина звукопроводу між магнітострикційним перетворювачем 5 і його вільним кінцем.

У даному МПП вимірюване переміщення може бути прикладене до магнітострикційного перетворювача 5, що може вільно рухатися уздовж нерухомого звукопроводу.

У перетворювачі 5 поєднані функції вхідного і вихідного магнітострикційного перетворювача.

Більш надійним буде МПП, у якого вимірюване переміщення прикладене до звукопроводу, що може переміщуватися разом із глушником щодо нерухомого перетворювача У цьому випадку не потрібне використання струмознімача в електричному колі між магнітострикційним перетворювачем 5 і електронними вузлами 4 і 6.

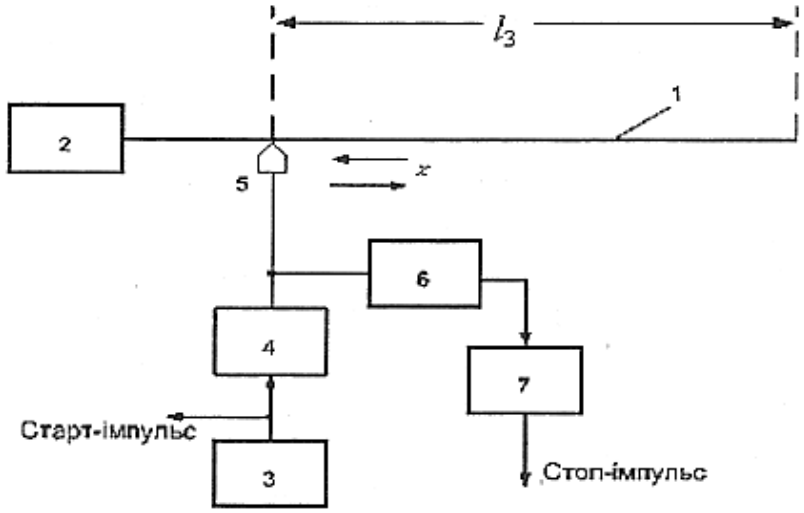


Рис. 8.19. Структурна схема магнітострикційного перетворювача лінійних переміщень в часовий інтервал:

1 – звукопровід, 2 – глушник, 3 – генератор циклів, 4 – підсилювач запису, 5 – вхідний та вихідний МПП, 6 – комутатор, 7 – підсилювач

В обох останніх випадках у МПП вимірюване переміщення перетвориться в часовий інтервал $t_{зат}$ (8.40), що у два рази більший у порівнянні з МПП (рис. 8.18).

Якщо $V_п > 0$ *і* $\Delta T° \neq 0$, то, як випливає з (8.36), вимірюване переміщення перетвориться в часовий інтервал

$$t_{U_1} = \frac{2l_3}{V_3(1-\gamma\Delta T°)-V_п}. \qquad (8.41)$$

Магнітострикційні перетворювачі переміщення в часовий інтервал (рис. 8.17, 8.18, 8.19) є циклічними, тобто здійснюють перетворення в моменти надходження імпульсів з генератора циклів. Через те, що період цих імпульсів повинен бути завжди більше t_{U1}, то це викликає появу похибки дискретизації.

Магнітострикційні перетворювачі переміщення в частоту імпульсів

На рис. 8.20 зображена структурна схема магнітострикційного перетворювача кутового переміщення в частоту імпульсів.

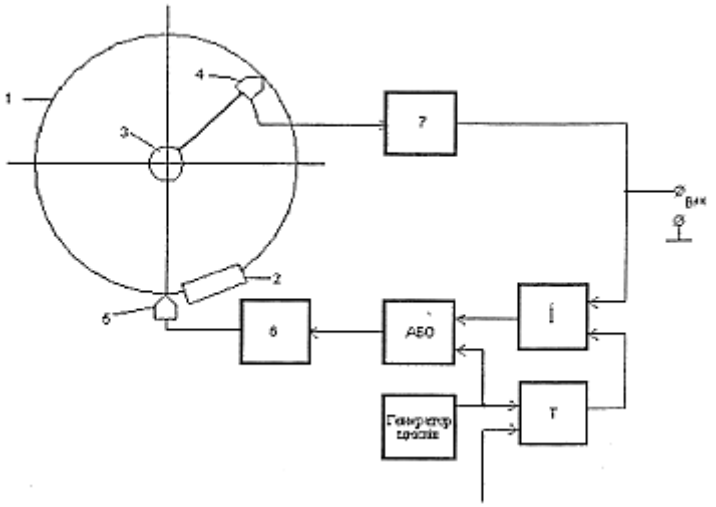


Рис. 8.20. Структурна схема магнітострикційного перетворювача кутового переміщення в частоту імпульсів:

1 – кільцевий звукопровід, 2 – глушник, 3 – вхідний вал, 4 – вихідний МПП, 5 – вхідний МПП, 6 – підсилювач запису, 7 – підсилювач зчитування

МПП містить магнітострикційний кільцевий звукопровід 1, кінці якого для усунення відбивань затиснуті загальним глушником 2. Вхідний вал 3, кут повороту якого вимірює МПП, жорстко закріплений із вихідним магнітострикційним перетворювачем 4, що може перемішуватися уздовж звукопроводу. Вхідний магнітострикційний перетворювач 5 закріплений нерухомо на звукопроводі в точці, що відповідає нульовому повороту вала.

Імпульс із виходу генератора циклів (старт-імпульс) установлює тригер Т в одиничний стан, а також проходить через елемент АБО, підсилюється підсилювачем запису *6* і надходить на обмотку вхідного магнітострикційного перетворювача 5. Під дією цього імпульсу в звукопроводі у зоні прямого перетворення перетворювача 5, внаслідок прямого ефекту магнітострикції, виникає ультразвуковий імпульс, що поширюється по звукопроводу зі швидкістю звуку $V_З$ і досягає зони зворотного перетворення вихідного магнітострикційного перетворювача 4 через час

$$t_{зат} = \frac{l_З}{V_З} ,$$

де $l_З$ – довжина звукопроводу між вхідним і вихідним магнітострикційними перетворювачами, що залежить від вимірюваного кута повороту вала.

Унаслідок зворотного ефекту магнітострикції в обмотці вихідного перетворювача *4* виникає електричний сигнал, що підсилюється і формується в імпульс підсилювачем зчитування 7.

Цей імпульс надходить на вихід МПП, будучи першим у її частотній послідовності.

Крім цього, цей імпульс проходить через відкритий логічний елемент І, через АБО, надходить на підсилювач запису і, зробивши циркуляцію по вищеописаному колу, через час $t_{зат}$ знову виникає на виході МПП, будучи вже другим у частотній послідовності і т.д.

Таким чином, на виході МПП у випадку $\Delta T° = 0$ і $V_п = 0$ формується послідовність імпульсів, період повторення яких дорівнює часу і, отже, миттєва частота проходження цих імпульсів - прямо пропорційна кутовому положенню вала.

Якщо, навколишня температура відрізняється від номінальної ($\Delta T° \neq 0$) і швидкість переміщення вихідного магнітострикційного перетворювача $V_п > 0$, то період проходження імпульсів на виході МП буде визначатися виразом t_{U_1}(8.36).

Для припинення формування частотної послідовності імпульсів подають замираючий імпульс на установлений вхід тригера Т.

При цьому тригер переключиться в нульовий стан, після чого логічний елемент І закривається, і коло циркуляції імпульсів розривається.

Даний пристрій (рис. 8.20) може використовуватися також для перетворення лінійних переміщень у частоту імпульсів. У цьому випадку використовують лінійний звукопровід, а рухливий магнітострикційний перетворювач (вхідний або вихідний), зв'язаний з об'єктом, що переміщується, може лінійно переміщуватися уздовж звукопроводу.

У МПП (рис. 8.20) присутня похибка $\Delta t_{пт}$ (8.33), але зменшена похибка дискретизації, тому що крок дискретизації – мінімальний і дорівнює часу перетворення t_{U_1}.

Магнітострикційні перетворювачі переміщень у цифровий код

Магнітострикційні перетворювачі переміщень у цифровий код мають значну перевагу над магнітострикційними перетворювачами переміщень у часовий інтервал і в частоту в тому, що при виконанні умови (8.54) (як буде показано далі) значно покращиться точність вимірювання переміщень. При виконанні умови (8.54) похибки $\Delta t_{пт}$ (8.33), викликані зміною температури $\Delta T°$ та впливом зміни швидкості переміщення $V_п$, не мають впливу на кінцевий результат вимірювання – вихідний цифровий код.

На рис. 8.21 зображена структурна схема магнітострикційного перетворювача кутових переміщень у цифровий код, що містить звукопровід 1, глушник 2, вихідний магнітострикційний перетворювач 3, зв'язаний з валом 4, кут повороту якого вимірюють, підсилювач 5 зчитування, вхідний магнітострикційний перетворювач 6, підсилювач запису 7, логічні елементи $Í_{8\text{-}10}$, лічильник імпульсів у циклі 11, дешифратор 12, елемент АБО 13, генератор циклів 14, лічильник вихідних імпульсів 15, тригер 16, інвертор 17, генератор імпульсів стабільної частоти 18.

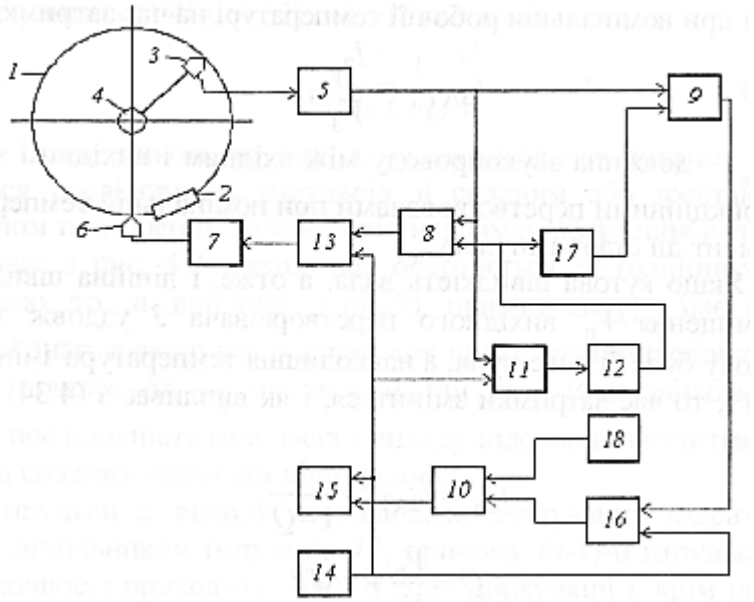


Рис. 8.21 Структурна схема магнітострикційного перетворювача кутових переміщень у цифровий код

При надходженні одиничного імпульсу (старт-імпульсу) з генератора циклів 14 встановлюються в нульові стани лічильники імпульсів 11 і 15. Старт-імпульс, що відзначає початок часового інтервалу, перемикає тригер 16 в одиничний стан, після чого потенціал з його виходу є дозволяючим для логічного елемента $И_{10}$. При цьому через елемент $И_{10}$ на лічильник 15 починають надходити імпульси від генератора 18, що має високу стабільність частоти. Крім того, старт-імпульс надходить через елемент АБО 13 на вхід підсилювача запису 7, а потім на обмотку вхідного магнітострикційного перетворювача 6. Під дією цього посиленого імпульсу у звукопроводі 1, у зоні його прямого перетворення, внаслідок прямого ефекту магнітострикції, виникає ультразвуковий імпульс. Цей імпульс поширюється по звукопроводу зі швидкістю звуку $V_З$ і надходить в зону зворотного перетворення вихідного магнітострикційного перетворювача 3, де він внаслідок зворотного ефекту магнітострикції перетворюється в електричний сигнал, який потім підсилюється і формується в імпульс підсилювачем зчитування 5. Імпульс з виходу підсилювача зчитування буде затриманий щодо старт-імпульсу при нульовій швидкості обертання вала і при номінальній робочій температурі на час затримки:

$$t_{\text{зат}_н} = \frac{l_{З_н}}{V_З}\ , \tag{8.42}$$

де $l_{З_н}$ – довжина звукопроводу між вхідним і вихідним магнітострикційними перетворювачами при номінальній температурі в момент дії старт-імпульсу.

Якщо кутова швидкість вала, а отже, і лінійна швидкість переміщення $V_{\text{п}}$ вихідного перетворювача 3 уздовж звукопроводу буде більше нуля, а навколишня температура зміниться на $\Delta T°$, то час затримки зміниться, і як випливає з (8.34) стане рівним

$$t_{U_1} = t_{ЗАТ_H}\frac{1}{1-Q}\,, \tag{8.43}$$

де $$Q = \frac{V_n}{V_з} + \gamma \Delta T^\circ .$$

Цей перший імпульс з виходу підсилювача зчитуваних надходить на вхід лічильника імпульсів 11, а також проходить через елемент Í$_8$, елемент АБО 13, надходить на підсилювач запису, і, зробивши циркуляцію по вищенаведеному колу, знову з'являється на виході підсилювача зчитування через час відносно першого.

Як випливає з виразів (8.29), (8.30) і (8.31)

$$t_{U_2} = t_{ЗАТ_Н} + (t_{U_1} + t_{U_2})\frac{V_П}{V_З} + (t_{U_1} + t_{U_2})\gamma \Delta T^\circ ,$$

або $$t_{U_2} = t_{ЗАТ_Н} + (t_{U_1} + t_{U_2})Q \qquad (8.44)$$

З рівнянь (8.43) і (8.44) отримаємо

$$t_{U_2} = t_{ЗАТ_Н}\left(\frac{1}{1-Q}\right)^2 . \qquad (8.45)$$

Другий імпульс знову, зробивши циркуляцію по вищенаведеному колу, виникає на виході підсилювача зчитування через час $t_{U_З}$ щодо другого імпульсу

$$t_{U_3} = t_{ЗАТ_Н} + (t_{U_1} + t_{U_2} + t_{U_3})Q \qquad (8.46)$$

З рівнянь (8.43), (8.45) і (8.46) випливає

$$t_{U_3} = t_{ЗАТ_Н}\left(\frac{1}{1-Q}\right)^3 \qquad (8.47)$$

і т.д. Таким чином, на виході підсилювача зчитування формується послідовність імпульсів зі спадним або зростаючим періодом повторення, залежно від напрямку обертання вала. Як випливає з рис. 8.21, якщо вал обертається за годинниковою стрілкою, то, як випливає з (8.29), приріст $\Delta t_{ЗАТ_П}$ має позитивний знак, а якщо вал обертається проти годинникової стрілки, то приріст $\Delta t_{ЗАТ_П}$має негативний знак. В останньому випадку послідовність імпульсів з виходу підсилювача зчитування буде зі спадним періодом повторення.

Імпульси з виходу підсилювача зчитування підраховуються лічильником імпульсів 11, причому (*n*-I)-й імпульс цієї послідовності проходить далі по колу циркуляції і, крім цього, надходячи на вхід лічильника 11, викликає появу на виході дешифратора 12 заборонного потенціалу для елемента Í$_8$, а на виході інвертора 17 з'являється дозволяючий потенціал для елемента Í$_9$.

Після цього коло циркуляції імпульсів розривається, і черговий *n*-й імпульс (стоп-імпульс), що виникає на виході підсилювача зчитування, проходить тільки через елемент Í$_9$ на вхід тригера 16, встановлюючи його в стан, при якому елемент Í$_{10}$ закривається і припиняється надходження імпульсів з генератора 18 на вхід лічильника 15. У цьому лічильнику буде

зафіксовано число імпульсів *N*, що розмістились на часовому інтервалі T_{U_n} між старт- і стоп-імпульсами, що є цифровим кодом кута повороту вала.

Таким чином, у кожному циклі вимірювання, що задається старт-імпульсом з виходу генератора циклів 14, відбувається перетворення кутового переміщення вала в частоту, що у свою чергу перетворюється в інтервал часу T_{U_n}, рівний часу між старт- і стоп-імпульсами, тобто дорівнює сумі *n* періодів вихідних імпульсів

$$T_{U_n} = t_{U_1} + t_{U_2} + ... + t_{U_n} \tag{8.48}$$

або

$$T_{U_n} = t_{ЗАТ_н}\left[\frac{1}{1-Q} + \frac{1}{(1-Q)^2} + \frac{1}{(1-Q)^3} + \cdots + \frac{1}{(1-Q)^n}\right] \tag{8.49}$$

Отриманий інтервал часу T_{U_n} можна подати у вигляді

$$T_{U_n} = t_{U_d} + \Delta T_U \tag{8.50}$$

де $T_{U_d} = n \cdot \mathrm{t}_{\mathrm{ЗАТ_Н}}$ – дійсне значення інтервалу часу, що відповідає вимірюваному куту повороту вала; ΔT_U – приріст інтервалу часу, обумовлений похибкою через вплив швидкості переміщення об'єкта й зміни навколишньої температури.

Число імпульсів *N*, зафіксованих у лічильнику імпульсів 15, дорівнює

$$N = \frac{T_{U_n}}{\tau} = \frac{T_{U_d}}{\tau} + \frac{\Delta T_U}{\tau} \tag{8.51}$$

де τ – період проходження імпульсів генератора стабільної частоти.

Для усунення впливу похибки ΔT_U на число імпульсів *N* необхідно, щоб

$$\Delta T_U < \tau. \tag{8.52}$$

Ця умова виконується вибором оптимального значення величини n, що задається дешифратором 12, тобто заданням числа імпульсів на виході підсилювача зчитування в серії між старт- і стоп-імпульсами.

З рівняння (8.50) випливає, що похибка

$$\Delta T_U = n\left(\frac{2n-1}{n}\Delta t'_{ЗАТ_П} + \Delta t_{ЗАТ_T}\right) \tag{8.53}$$

Для усунення впливу цієї похибки на покази лічильника імпульсів 15 необхідно, щоб $\Delta T_U < \tau$.

Зі спільного розв'язку рівнянь (8.42), (8.30), (8.52) і (8.53) одержуємо

$$n < \frac{\tau \cdot V_З^2 + V_П \cdot l_{З_{max}}}{l_{З_{max}}(2V_П + V_З \cdot \gamma \Delta T^\circ)}, \tag{8.54}$$

де $l_{З_{max}}$ – максимальна довжина звукопроводу між вхідним і вихідним магнітострикційними перетворювачами в даному пристрої.

Виконання умови (8.54) призводить до значного поліпшення точності вимірювання кута повороту вала, оскільки у цьому разі похибка ΔT_U (8.53), викликана зміною температури $\Delta T_U{}^\circ$ та впливом зміни швидкості переміщення $\mathrm{V_п}$, не впливає на кінцевий результат виміру – цифровий код, зафіксований у лічильнику імпульсів 15.

Таким чином, у кожному циклі вимірювання, що задаються генератором циклів, після надходження стоп-імпульсу в лічильнику 15 буде зафіксоване число імпульсів *N*. що визначає миттєве значення кута повороту вала

$$N = \frac{T_{U_n}}{\tau} = \frac{n \cdot t_{ЗАТ_H}}{\tau} \tag{8.55}$$

або, з огляду на (8.42),

$$N = n \cdot \frac{l_{З_н}}{\tau \cdot V_З} \tag{8.56}$$

оскільки за умовою $\frac{\Delta T_U}{\tau} < 1$.

Отже, чим більшою буде задана величина $n_{\max}$, що задовольняє умову (8.54), тим вищою буде роздільна здатність і меншою відносна похибка δ вимірювання кута повороту вала,
де

$$\delta = \pm \frac{1}{N} \tag{8.57}$$

Збільшення n і N , а отже збільшення точності перетворення, може бути досягнуте при використанні звукопроводу з мінімальним температурним коефіцієнтом затримки γ , і якщо це можливо, шляхом зменшення швидкості переміщення $V_{\text{п}}$ вимірюваного об'єкта. З метою досягнення найбільшої точності перетворення переміщення в цифровий код, звукопровід необхідно виконувати з дисперсійнотверднучих елинварних сплавів.

Температурний коефіцієнт затримки γ звукопроводу, виконаного з цього сплаву, залежить від попереднього режиму його термічної обробки. Підібравши оптимальний режим термічної обробки, можна одержати мінімальний коефіцієнт $\gamma \approx 1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$.

У МПП (рис. 8.21) перетворення часового інтервалу ΔT_{U_n} в цифровий код здійснюється методом послідовного підрахунку. Виникаючі при цьому перетворенні додаткові похибки Δt_1 і Δt_2 розглянуті в розд. 9.

Для усунення похибок Δt_1 і Δt_2 можна використати додатково до схеми, наведеної на рис. 8.21, схеми, що реалізують метод затриманих збігів і схему синхронізації старт-імпульсу з імпульсами генератора стабільної частоти. Необхідно зазначити, що метод електронного ноніуса призводить до збільшення часу перетворення, і відповідно призводить до збільшення похибки ΔT_U (8.53).

У розглянутому МПП (рис. 8.21) не висувається вимога до використання максимально можливої частоти імпульсів генератора стабільної частоти, оскільки при виконанні умови (8.54) результуюче число імпульсів цифрового коду *N* мало залежить від величини τ. Це є перевагою розглянутого МПП.

Пристрій, зображений на рис. 8.21, може використовуватися також для перетворення лінійних переміщень у цифровий код. У цьому випадку необхідно використовувати лінійний звукопровід, а об'єкт, що переміщується, пов'язаний з рухливим магнітострикційним перетворювачем (вхідним або вихідним), що може лінійно переміщуватися вздовж

звукопроводу. У цьому випадку принцип дії МПП і аналіз похибок залишаються такими ж, як у вище розглянутому МПП (рис. 8.21).

Магнітострикційний перетворювач переміщення і швидкості переміщення в цифровий код

В основу роботи пристрою для вимірювання швидкості переміщення покладено такий алгоритм: визначають цифровий код N_1, що відповідає миттєвому значенню кута повороту вала в момент часу t_1 і визначають цифровий код N_2, що відповідає миттєвому значенню кута повороту вала в момент часу

$$t_2 = t_1 + t_{од}, \tag{8.58}$$

де $t_{од}$ – стабільний інтервал часу.

Як випливає з (8.56)

$$N_1 = \frac{n \cdot l_{ЗН_1}}{\tau \cdot V_З} \tag{8.59}$$

і $$N_2 = \frac{n \cdot l_{ЗН_2}}{\tau \cdot V_З}, \tag{8.60}$$

де $l_{ЗН_1}$ і $l_{ЗН_2}$ – відповідно довжина звукопроводу між вхідним і вихідним магнітострикційними перетворювачами в момент часу t_1 і t_2.

Різниця цих цифрових кодів дорівнює

$$\Delta N = N_2 - N_1 = \frac{n}{\tau \cdot V_З}\left(l_{ЗН_2} - l_{ЗН_1}\right), \tag{8.61}$$

Оскільки

$$l_{ЗН_2} = l_{ЗН_1} + \Delta l_З, \tag{8.62}$$

де $$\Delta l_З = t_{од} \cdot V_П \tag{8.63}$$

де $\Delta l_З$ – зміна довжини звукопроводу, що відбулася за час $t_{од}$, то з рівнянь (8.61) і (8.62) одержуємо

$$\Delta N = \frac{n \cdot t_{од}}{\tau \cdot V_З} \cdot V_П \tag{8.64}$$

Переходячи до кутової швидкості обертання вала, одержимо

$$\Delta N = \frac{n \cdot t_{од} \cdot R}{\tau \cdot V_З} \cdot \omega \tag{8.65}$$

де ω – кутова швидкість обертання вала; R – радіус кільця, утвореного звукопроводом.

Оскільки параметри n, $t_{од}$, τ, $V_З$ і R є постійними величинами, то цифровий код ΔN прямо пропорційно визначає лінійну швидкість переміщення $V_П$ або кутову швидкість переміщення ω.

На рис. 8.22 наведена структурна схема магнітострикційного перетворювача переміщення і швидкості переміщення в цифровий код, що реалізує вищенаведений алгоритм роботи. Пристрій містить звукопровід 1, глушник 2, вихідний магнітострикційний перетворювач 3, жорстко пов'язаний з валом 4, підсилювач зчитування 5, вхідний магнітострикційний перетворювач 6, підсилювач запису 7, логічні елементи $Ĺ_{8\text{-}10}$, 22, 26, лічильник імпульсів 11, дешифратор 12, елементи АБО 13, 25, генератор циклів 14, лічильник 15, тригери 16, 21, інвертор 17, генератор імпульсів стабільної

частоти 18, одновібратор 19, формувач імпульсів 20, лічильник імпульсів 23, схема формування різниці кодів 24, елемент затримки 27.

Вхідний вал, кут повороту і кутову швидкість якого вимірюють, розташований в центрі кільця, утвореного звукопроводом. Частина структурної схеми, що обведена пунктиром, є схемою перетворювача кута повороту вала в цифровий код, розглянутий раніше на схемі (рис. 8.21).

Даний пристрій може використовуватися також для перетворення лінійних переміщень і лінійної швидкості переміщення в цифровий код. У цьому випадку використовують лінійний звукопровід 1, а рухливий магнітострикційний перетворювач 3, пов'язаний з об'єктом, що переміщується, може переміщуватися вздовж звукопроводу, закріпленого між двома глушниками.

Пристрій (рис. 8.22) працює так.

У момент часу t_1 одиничний імпульс (старт-імпульс) з виходу генератора циклів 14 встановлює в нульовий стан тригер 21, обнуляє лічильники імпульсів 11, 15, 23, схему 24 і перемикає тригер 16 в одиничний стан, після чого потенціал його виходу стає дозволяючим для елементів $И_{10}$ і $И_{26}$. Після цього через елемент $И_{10}$ на лічильник імпульсів 15 починають надходити імпульси від генератора імпульсів 18, що має високу стабільність.

Крім цього, старт-імпульс проходить через елемент АБО 13, підсилюється підсилювачем запису 7, і надходить на обмотку вхідного магнітострикційного перетворювача 6, де він, внаслідок прямого ефекту магнітострикції, збуджує у звукопроводі ультразвуковий імпульс.

Цей імпульс поширюється по звукопроводу зі швидкістю звуку V_3 і через час T_{U_1} він надійде в зону зворотного перетворення вихідного магнітострикційного перетворювача 3, де він внаслідок зворотнього ефекту магнітострикції перетвориться в електричний сигнал, що підсилюється і формується в імпульс підсилювачем зчитування 5. Цей імпульс із виходу підсилювача 5, затриманий відносно старт-імпульсу на час T_{U_1} проходить через елемент $И_8$ елемент АБО 13, підсилювач запису 7 і, зробивши циркуляцію по вищенаведеному колу, знову виникає на виході підсилювача зчитування 5 через час T_{U_2} відносно старт-імпульсу. Цей (другий) імпульс знову, зробивши циркуляцію, виникає на виході підсилювача 5 через час T_{U_3} відносно старт-імпульсу і т.д.

Таким чином, у першому циклі перетворення, на виході підсилювача зчитування 5 формується послідовність імпульсів зі спадним або зростаючими періодами повторення, залежно від напрямку обертання вала. Ці імпульси підраховуються лічильником імпульсів 11 і n-й імпульс, що з'являється на виході підсилювача 5 (стоп-імпульс) через час T_{U_n} відносно старт-імпульсу є останнім у цій серії імпульсів, після чого вихід дешифратора 12 є заборонним для елемента $И_8$, і коло циркуляції імпульсів розривається. У цей же час потенціал із виходу елемента НІ 17 стає дозволяючим для елемента $И_9$.

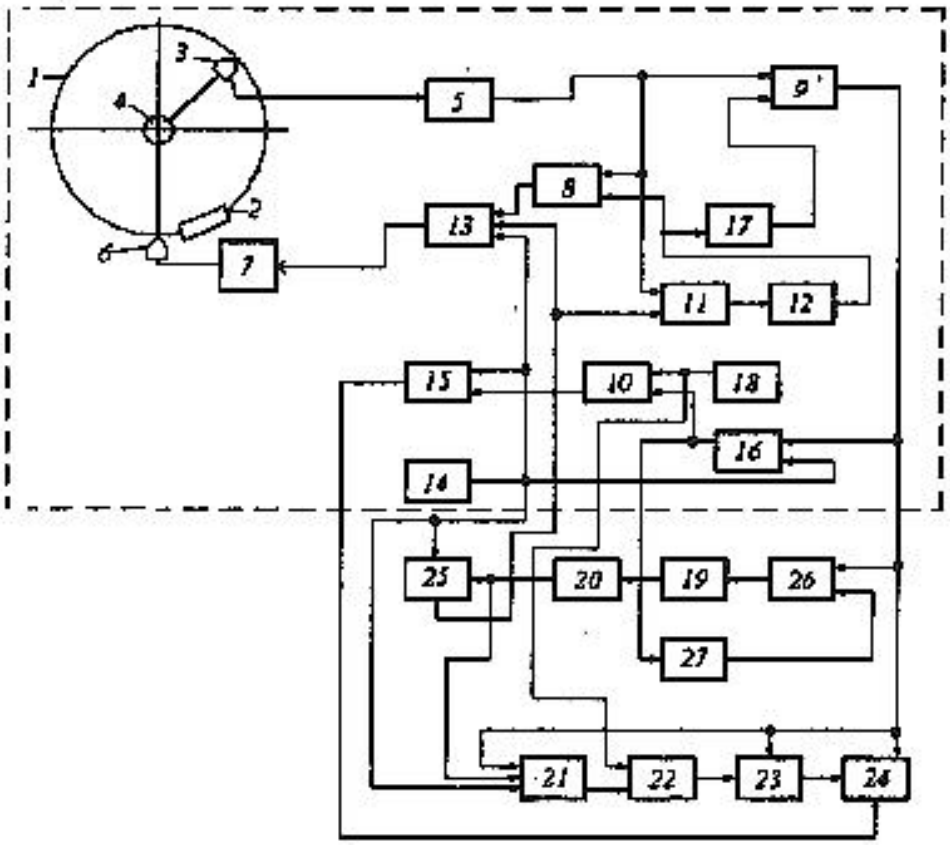


Рис.8.22 Структурна схема магнітострикційного перетворювача переміщення і швидкості переміщення в цифровий код

Стоп-імпульс проходить через відкритий елемент $И_9$ і перемикає тригер Т 16 в нульовий стан, після чого елемент $И_{10}$ закривається і на вхід лічильника 15 перестають надходити імпульси з виходу генератора 18. У лічильнику 75 буде зафіксований цифровий код N_1, що відповідає значенню кута повороту вала на момент дії першого старт-імпульсу. Числа N_1 і n визначаються відповідно виразами (8.54) і (8.56), а звідси

$$N_1 = n \cdot \frac{l_{зн_1}}{\tau \cdot V_з}, \qquad (8.66)$$

Крім цього стоп-імпульс з виходу елемента $И_9$ проходить через елемент $И_{26}$ і запускає одновібратор 19. Після цього через деякий час, визначений елементом затримки 27, потенціал з виходу тригера Т 16 закриває елемент $И_{26}$.

Через час $t_{од}$ одновібратор 19 повертається у свій вихідний стан, а на виході формувача 20 з'являється імпульс у момент часу t_2, що є старт-імпульсом у наступному циклі вимірювання кута повороту вала. Формувач 20 призначений для формування імпульсу необхідної тривалості, передній фронт якого збігається із заднім фронтом імпульсу, що генерується одновібратором 19.

Цей старт-імпульс встановлює в нульовий стан лічильник імпульсів 11 і перемикає тригер Т 21 в одиничний стан. Після цього імпульси з генератора 18 через відкритий елемент $И_{22}$ почнуть надходити на вхід лічильника імпульсів 23.

Крім цього, старт-імпульс проходить через елементи АБО 25 і 13, підсилюється підсилювачем запису 7 і надходить на вхідний магнітострикційний перетворювач 6 і далі по колу циркуляції.

На виході підсилювача зчитування 5 з'являється перший імпульс, що буде затриманий відносно старт-імпульсу на час

$$t_{ЗАТ_2} = \frac{l_{зн_2}}{V_з} = \frac{l_{зн_1} + \Delta l_3}{V_з}, \tag{8.67}$$

$l_{зн_1}$ і $l_{зн_2}$ – відповідно довжина звукопроводу в моменти t_1 і t_2 ; Δl_3 – зміна довжини звукопроводу, що відбулася за час $t_{од}$ і визначається рівнянням (8.63).

Вираз (8.67) визначає час затримки імпульсу в момент часу t_2 (8.58) без урахування впливу швидкості переміщення і зміни навколишньої температури.

З урахуванням впливу цих параметрів загальний час затримки дорівнює

$$T_{V_1} = \mathrm{t_{ЗАТ_2}} + \Delta \mathrm{t''_{ЗАТ.П}} + \Delta \mathrm{t_{ЗАТ.Т}}, \tag{8.68}$$

де,
$$\Delta \mathrm{t''_{зат.п}} = \mathrm{t_{зат_2}} \cdot \frac{\mathrm{V_n}}{\mathrm{V_з}}. \tag{8.69}$$

Вираз $\Delta \mathrm{t_{зат.т}}$ визначається рівнянням (8.30).

Зрівнянь (8.68), (8.66) і (8.63) випливає

$$\Delta t''_{ЗАТ.П} = \frac{(l_{ЗН_1} + t_{од} + \mathrm{V_n})\mathrm{V_n}}{V_з^2} \tag{8.70}$$

Перший імпульс з виходу підсилювача зчитування 5 проходить по колу циркуляції, а потім з'являється на виході підсилювача 5 через час T_{v2} відносно старт-імпульсу, будучи другим у частотній послідовності, де

$$T_{v_2} = 2T_{v_1} + \Delta t''_{ЗАТ.П} \tag{8.71}$$

Ці імпульси підраховуються лічильником імпульсів 11 і після (n-1)-го імпульсу цієї послідовності коло циркуляції розривається і черговий n-й імпульс (стоп-імпульс) проходить через елемент Í$_9$ і перемикає тригер Т 21. В результаті цього елемент Í$_{22}$ закривається і припиняється надходження імпульсів на вхід лічильника імпульсів 23, у якому буде зафіксоване число імпульсів

$$N_2 = \frac{\mathrm{T_{V_n}}}{\tau}, \tag{8.72}$$

де τ – період проходження імпульсів генератора 18;

T_{V_n} – часовий інтервал між старт- і стоп-імпульсами в другому циклі вимірювання:

$$T_{V_n} = nt_{ЗАТ_2} + n\left(\frac{2n-1}{n}\Delta t''_{ЗАТ.Т} + \Delta t_{ЗАТ.Т}\right). \tag{8.73}$$

Цифровий код N_2 відповідає вимірюваному куту повороту вала в момент часу t_2. Приріст

$$\Delta T_{V_n} = nt_{ЗАТ_2} + n\left(\frac{2n-1}{n}\Delta t''_{ЗАТ.Т} + \Delta t_{ЗАТ.Т}\right). \tag{8.74}$$

є похибкою перетворення кута повороту вала, викликаний впливом швидкості переміщення перетворювача З і зміною навколишньої температури на $\Delta T°C$.

Для усунення впливу цих похибок на показання N_2 необхідно, щоб

$$\Delta T_{V_n} < \tau \tag{8.75}$$

Звідси з урахуванням рівнянь (8.72), (8.69) і (8.74) визначаємо число n, при якому виконується умова (8.74):

$$n < \frac{\tau \cdot V_3^2 + V_n(l_{зн_1} + t_{од} \cdot V_П)}{(l_{зн_1} + t_{од} \cdot V_П)(2V_n + V_3 \cdot \gamma \cdot \Delta T°)} \tag{8.76}$$

У розглянутому пристрої число n як у першому, так і в другому циклі є тим самим, і задається за допомогою дешифратора 12, тому число n вибирається найменшим із двох значень, що визначаються з рівнянь (8.54) і (8.75).

Якщо виконано умову (8.75), то

$$N_2 = \frac{n \cdot t_{зам_2}}{\tau} = n \cdot \frac{l_{зн_1} + \Delta l_3}{\tau \cdot V_3} \tag{8.77}$$

Після закінчення підрахунку числа імпульсів N_2, схема формування різниці кодів 24 визначає різницю

$$\Delta N = N_2 - N_1 \tag{8.78}$$

Як випливає з рівнянь (8.65) і (8.76)

$$\Delta N = n \frac{\Delta l_3}{\tau \cdot V_3} \tag{8.79}$$

Підставляючи (8.63) в (8.78), одержимо

$$\Delta N = \frac{n \cdot t_{од}}{\tau \cdot V_3} \cdot V_n = \frac{n \cdot t_{од} \cdot R}{\tau \cdot V_3} \omega \tag{8.80}$$

Звідси випливає, що зафіксований у схемі формування різниці кодів 24 цифровий код ΔN відповідає лінійній швидкості переміщення $V_п$ вихідного перетворювача 3 вздовж звукопроводу, і також визначає кутову швидкість обертання вала 4. Одночасно з цим схема 24 формує код знака напрямку обертання (переміщення), бо, якщо напрямок обертання вала відбувається за годинниковою стрілкою, то $N_2 > N_1$.

У лічильнику 15 зберігається цифровий код $N1$, що відповідає вимірюваному куту повороту вала в момент дії старт-імпульсу з виходу генератора циклів 14 (момент часу t_1), а в лічильнику 23 зберігається цифровий код N_2, що відповідає куту повороту вала в момент часу $t_2 = t_1 + t_{од}$.

Наступний цикл вимірювання починається з надходження наступного імпульсу з виходу генератора циклів 14, що обнулює лічильники імпульсів 11, 15, 23, схему 24, і весь процес вимірювання повторюється знову.

Таким чином, у кожному циклі вимірювання, що задається генератором 14, відбувається вимірювання кута повороту вала, визначається напрямок обертання вала, і при цьому відбувається вимірювання кутової швидкості обертання вала в обох напрямках.

8.7. Вимірювання параметрів обертового руху

Швидкість обертання елементів машин, пристроїв та агрегатів є однією з найважливіших характеристик досліджуваного об'єкта.

Швидкість обертання визначається кількістю обертів за хвилину $n\left(об/_{хв}\right)$, що зв'язана з частотою обертання *f*, такою

$$f = \frac{n}{60}\ ;\ \ n = 60f\ . \tag{8.81}$$

До методів вимірювання швидкості обертання і частоти обертання належать:

1) методи, засновані на перетворенні швидкості обертання у величину переміщення;

2) методи, засновані на перетворенні швидкості обертання в пропорційний електричний сигнал і т.д.

Для перетворення швидкості обертання у величину переміщення найбільшого поширення набули пристрої з використанням вихрових струмів або відцентрової сили.

Пристрій перетворювача першого типу зображено на рис. 8.23.

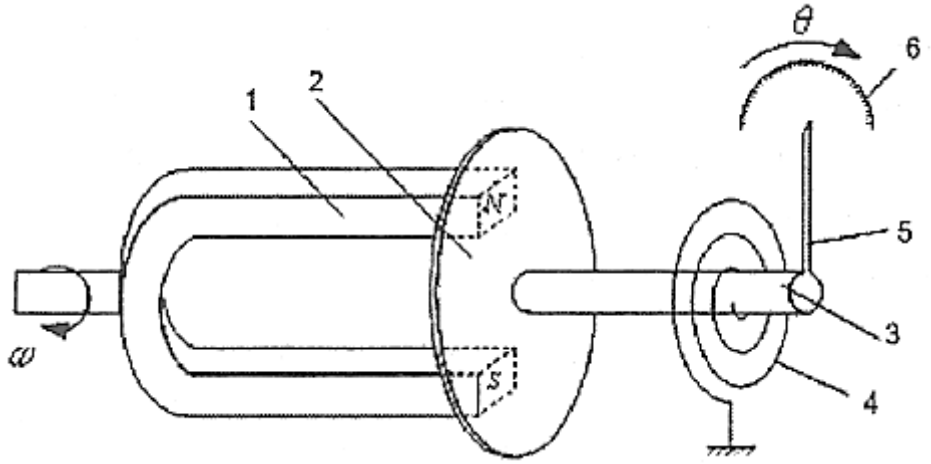


Рис. 8.23. Пристрій перетворювача швидкості обертання у величину переміщення з використанням вихрових струмів:

1 – постійний магніт, 2 – металевий диск, 3 – вал, 4 – пружина, 5 – шток, 6 – відліковий пристрій кута повороту вала

Постійний магніт 1 жорстко пов'язаний з обертовим об'єктом, і, отже, він обертається з кутовою швидкістю ω.

У металевому диску 2, насадженому на вал 3, утворюються вихрові струми, які, взаємодіючи з потоком магніту, створюють обертальний момент, пропорційний вимірюваній кутовій швидкості обертання ω:

$$M = R_B \cdot \omega \tag{8.82}$$

де

$$R_B = K\text{п}\frac{\Phi^2}{\rho}, \tag{8.83}$$

де Ф – магнітний потік; р – питомий опір матеріалу диска;

$K_\text{п}$ – коефіцієнт, що враховує конструктивні параметри диска та магніта.

Момент, прикладений до диска, зрівноважується протидіючим моментом, створюваним спіральною пружиною 4:

$$M_n = k_{ж}\theta\ , \tag{8.84}$$

де $k_{ж}$ – жорсткість пружини; Θ – кут повороту вала *З*.

Оскільки $M=M_n$,то з рівнянь (8.81) і (8.83) одержуємо

$$\theta = \frac{R_B}{k_{ж}} \cdot \omega \tag{8.85}$$

Кут повороту вала θ , пропорційний кутовій швидкості обертання ω, можна визначити за допомогою розглянутих раніше перетворювачів кута повороту в електричний сигнал.

Похибки розглянутого перетворювача, як випливає з рівнянь (8.84), залежать від жорсткості пружини $k_{ж}$, від нестабільності коефіцієнта $R_{в}$ і величини тертя. Максимальна похибка становить 1,5%.

На рис. 8.24 зображено пристрій для перетворення швидкості обертання у величину переміщення з використанням відцентрового перетворювача.

При обертанні вала перетворювача зі швидкістю ω на вантажі 1 діють відцентрові сили

$$F_{ц} = m\omega^2 r, \tag{8.86}$$

де m – величина маси вантажів; r – радіус обертання вантажів.

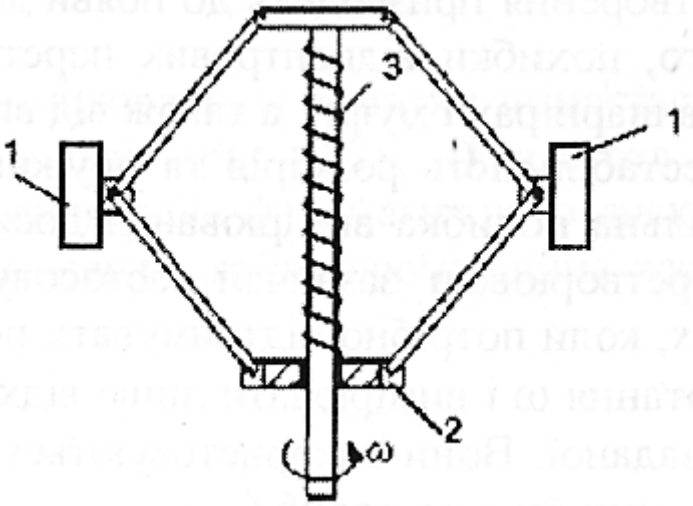


Рис. 8.24 Пристрій для перетворення швидкості обертання у величину переміщення з використанням відцентрового перетворювача:

1 – вантажі, 2 – муфта ковзання, 3 – пружина

Відцентрова сила викликає появу сили F_y , що спрямована вздовж осі обертання і переміщує муфту ковзання 2 на y. Сила F_y врівноважується силою пружності пружини 3:

$$F_n = k_{ж} \cdot y\ . \tag{8.87}$$

Таким чином, при рівновазі

$$F_n = F_y\ . \tag{8.88}$$

Оскільки

$$F_y = \text{К}_{\text{п}} \cdot F_{ц}\ , \tag{8.89}$$

де *К*п – коефіцієнт пропорційності, залежний від конструктивних параметрів пристрія та числа вантажів, то на підставі рівнянь (8.86) – (8.88) одержимо

$$k_{ж}y = K\text{п} \cdot m\omega^2 r\ . \tag{8.90}$$

Звідки

$$y = \frac{K_{\text{п}} \cdot mr}{k_{ж}} \omega^2 . \quad (8.91)$$

З рівняння (8.90) випливає, що величина переміщення у муфти перетворювача залежить від величини швидкості обертання ω, причому ця залежність *y* від ω – нелінійна. Ця нелінійність перетворення призводить до появи додаткових похибок. Крім цього, похибки відцентрових перетворювачів залежать від тертя в шарнірах і муфті, а також від впливу зміни температури на нестабільність розмірів та пружних властивостей елементів. Загальна похибка вимірювання досягає 10 %. Тому відцентрові перетворювачі зазвичай застосовують у регулюючих пристроях, коли потрібно підтримувати постійною задану швидкість обертання ω і вимірювати лише відхилення реальної швидкості від заданої. Вони використовуються для вимірювання кутових швидкостей до 1 000 об/хв .

Для перетворення швидкості обертання можуть використовуватися тахометри. На рис. 8.25, *а* наведений імпульсний індукційний тахометр. Первинний перетворювач такого тахометра має вимірювальну обмотку 1, розміщену на розімкнутому сталевому осерді 2, через який замикається магнітний потік постійного магніту 3. На валу, частота обертання якого вимірюється, кріпиться феромагнітний зубчастий диск 5. При обертанні вала зубчастий виступ 4 проходить біля розімкнутої частини осердя, зменшує повітряний проміжок між зубом і осердям, що призводить до зменшення магнітного опору $R_{\text{м}}$ осердя, як зображено на рис. 8.25, *б*. Відповідно до цього змінюється магнітний потік, що проходить через вимірювальну обмотку і в ній індукується ЕРС

$$E = -W\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\left(\frac{F_м}{R_м}\right), \quad (8.92)$$

де $F_м$– магніторушійна сила постійного магніту;
$R_м$ – магнітний опір осердя, W – число витків обмотки.

З виводів вимірювальної обмотки знімається послідовність двополярних імпульсів (рис. 8.25, *б*), частота яких дорівнює частоті проходження зубів феромагнітного диска поблизу розімкнутої частини осердя, тобто пропорційна частоті обертання вала

$$f = \frac{P \cdot n}{60}, \quad (8.93)$$

де P – кількість зубів диска; n – частота обертання вала, об/хв.

Вторинним перетворювачем розглянутого пристрою є частотомір, проградуйований в одиницях частоти обертання.

Джерелом похибок розглянутого перетворювача може бути струм, споживаний вторинним перетворювачем. Цей струм, проходячи по вимірювальній обмотці індукційного перетворювача, створює магнітне поле, що відповідно до правила Ленца, спрямоване зустрічно до напрямку основного поля і робить розмагнічувальне діяння.

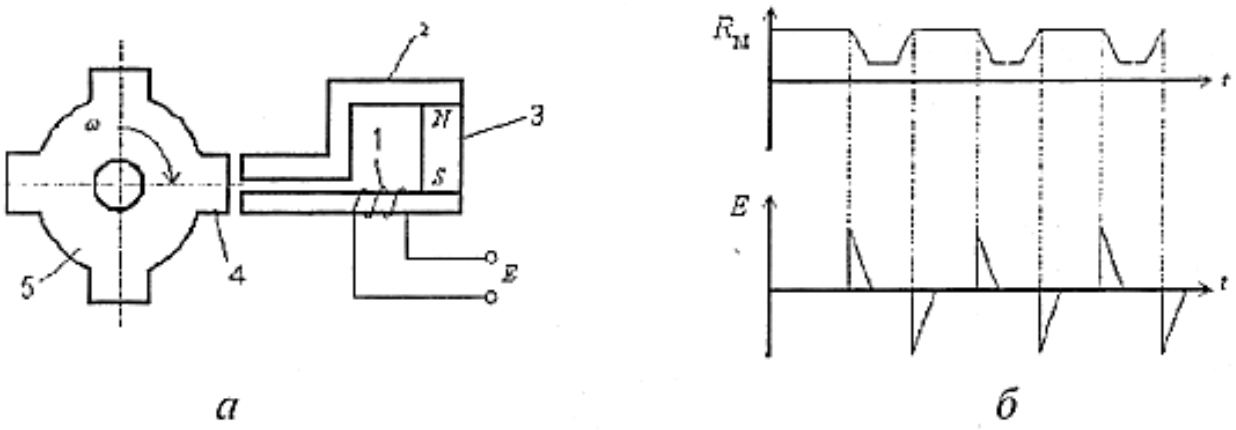


Рис. 8.25 Імпульсний індукційний тахометр (*а*):
1 – вимірювальна обмотка, 2 – осердя, 3 – постійний магніт, 4 – зубчастий виступ, 5 – зубчастий диск. ЕРС та магнітний опір осердя імпульсного індукційного тахометра (*б*)

Внаслідок цього зменшується напруга вихідних сигналів, що знімаються з вимірювальної обмотки, а функція перетворення стає нелінійною, що призводить до збільшення похибки.

8.8. Вимірювання деформації поверхні досліджуваного об'єкта

Найпоширенішим методом вимірювання деформацій є так званий тензометричний метод, у якому як первинні перетворювачі деформації використовують тензорезистори (розд. 2). Металеві тензорезистори використовують при вимірюванні відносних деформацій від 0.002 до 1... 2 %, напівпровідникові – до 0,1... 0,2%.

Тензорезистори можуть використовуватися для вимірювань статичних та змінних деформацій у діапазоні частот до 100 кГц.

Для вимірювання деформацій тензорезистор наклеюють на досліджувану деталь так, щоб деформація дедалі повністю сприймалась тензорезистором. Для температур до 200°С застосовують клеї БФ, бакелітовий лак, а для вищих температур – жаростійкі кремнієорганічні цементи. Особливістю приклеюваних тензорезисторів є те, що вони не можуть бути переклеєні з об'єкта на об'єкт. Тому дійсна функція перетворення робочого тензорезистора не може бути визначена, а для її оцінки використовують функцію перетворення градуювального тензорезистора з цієї партії.

Похибка від неідентичності дійсної та номінальної функції перетворення з достатньо однорідної партії не перевищує 1,5 %.

Вихідним параметром тензорезисторів є зміна їхнього опору пропорційно вимірюваній деформації, тому в якості вимірювальної схеми тензоперетворювачів застосовують мостові схеми з живленням змінним або постійним струмом. Коливання навколишньої температури викликає зміну опору тензорезистора. Через те, що відносна зміна опору тензорезистора під

дією вимірюваної деформації дуже мала (менше 1 %), температурні зміни його опору можуть призвести до значних похибок.

Для усунення цієї температурної похибки використовують мостову схему з двома тензорезисторами R_{T_1} і R_{T_2} (рис. 8.26), один із яких є робочим, а другий – термокомпенсуючим.

Робочий тензорезистор наклеюють на досліджувану деталь уздовж очікуваної деформації, а компенсаційний – поперек.

Температурні умови й температурні зміни опорів тензорезисторів повинні бути однаковими. Тензорезистори включаються в суміжні плечі моста, і це компенсує температурну похибку.

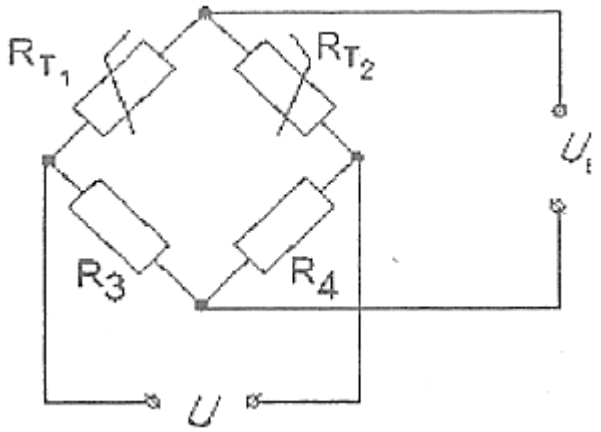


Рис.8.26. Мостова схема вимірювання деформацій з двома тензорезисторами

Якщо опір навантаження досить великий (режим холостого ходу), то вихідна напруга моста

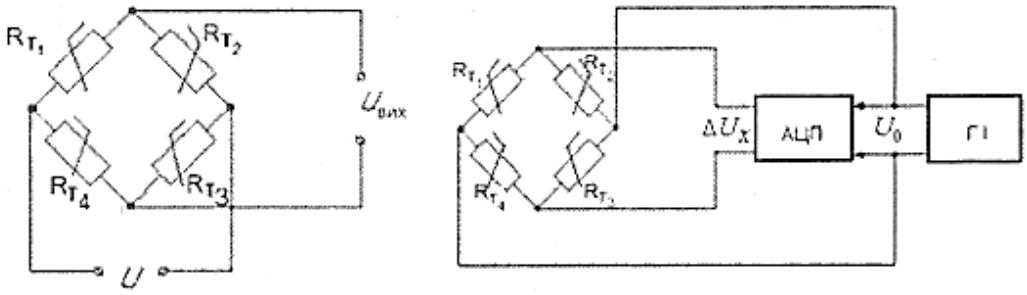
$$U_{вих_x} = \frac{UR_{T_1}}{R_{T_1}+R_{T_2}} - \frac{UR_3}{R_{T_3}+R_{T_4}}. \qquad (8.94)$$

При відсутності деформації $R_{T_1} = R_{T_2}$ і, якщо $R_3 = R_4$ то. міст буде зрівноважений, а $U_{вих} = 0$.

При деформації тензорезисторів, коли $R_{T1} \neq R_{T2}$, вихідна напруга

$$U_{вих_x} = \frac{U(R_{T_1}-R_{T_2})}{2(R_{T_1}+R_{T_2})} \qquad (8.95)$$

Отже, вихідна напруга моста змінюється пропорційно різниці опорів тензорезисторів. Якщо елементи мостової схеми вибрані оптимальними, то її чутливість може бути підвищена лише за рахунок збільшення тензочутливості перетворювача і за рахунок збільшення сили струму, що протікає через перетворювач. Однак збільшення струму через перетворювач обмежено його теплорозсіюючою здатністю. Тому для збільшення чутливості в мостову схему включають чотири однакових тензорезистори. що наклеюють на досліджувану деталь так, що тензорезистори R_{T_1} і R_{T_3}, (рис. 8.27, *а*) перетворюють поздовжню деформацію, а R_{T_2} і R_{T_4} – поперечну. У цій мостовій схемі температурна похибка буде також компенсуватися.



а *б*

Рис. 8.27 Мостові схеми вимірювання деформацій:

а – з чотирма тензорезисторами, *б* – з чотирма тензорезисторами та із застосуванням імпульсного живлення

Чутливість схеми може бути підвищена також за рахунок застосування імпульсного живлення. У цьому випадку чутливість збільшується в десятки разів шляхом підвищення напруги живлення вимірювального кола моста без порушення нормального режиму роботи тензоперетворювача. Застосування імпульсного живлення дозволяє на виході моста одержати прямокутні імпульси напруги (струму), амплітуда яких пропорційна різниці значень опорів тензорезисторів, що змінюються. Отримані імпульси можуть бути перетворені в цифровий код за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

На рис. 8.27, *б* зображена структурна схема тензометричного вимірювального перетворювача при живленні моста R_{T_1}, R_{T_2} ,R_{T_3}, R_{T_4} прямокутними імпульсами струму від генератора імпульсів ГІ. Одночасно від генератора ГІ прямокутні імпульси опорної напруги U_0 надходять на вхід АЦП, де вони порівнюються з напругою небалансу мостової схеми ΔUx.

Вихідний цифровий код АЦП пропорційний відношенню сигналів ΔU_x й U_0 та не залежить від параметрів імпульсів живлення U_0.

8.9. Вимірювання механічних сил

Переважна більшість силовимірювальних пристроїв (динамометрів) заснована на методі перетворення вимірюваної сили в механічні напруження у матеріалі пружного перетворювального елемента, його деформацію або переміщення, які за допомогою п'єзоелектричних, тензорезистивних, індуктивних, ємнісних чи інших перетворювачів, перетворюються в електричним сигнал, або зміну вихідного електричного параметра.

Перетворювання вимірюваної сили в переміщення здійснюється за допомогою пружних елементів, деформація яких залежить від величини вимірюваної сили. Нині розроблено велику кількість пружних елементів, що дозволяють вимірювати сили від 10^{-3} до 10^5 Н (рис. 8.28).

Для вимірювання зосереджених великих сил F використовують пружні елементи у вигляді стрижнів (рис. 8.28, *а)*. Недоліком стрижневих пружних елементів є дуже малі вихідні переміщення (деформації), тому вони використовуються лише з тензорезистивними перетворювачами.

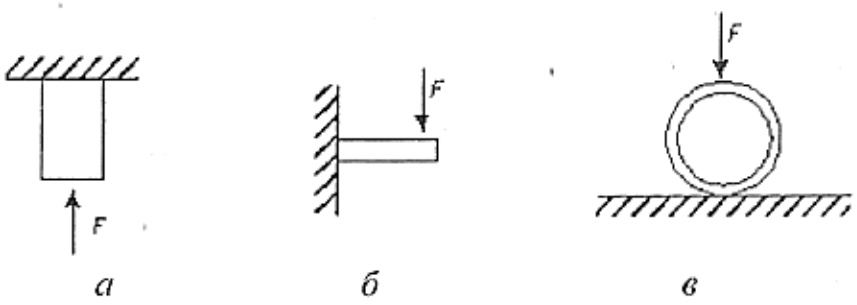


Рис. 8.28. Пружні елементи у вигляді:
а – стрижнів, *б* – балок, *в* – кілець

Найчутливішими до дії сил є балкові пружні елементи (рис. 8.28, *б*) та кільцеві пружні елементи (рис. 8.28, *в*).

Вони мають відносно великі вихідні переміщення, що дає змогу використовувати їх у ємнісних та індуктивних датчиках.

Пружні елементи виконують таким чином, щоб їхні характеристики перетворення наближалися до лінійних. Чутливість пружних елементів визначається величиною їхньої жорсткості

$$F = k_{ж} \cdot д, \qquad (8.96)$$

де $k_{ж}$ – жорсткість пружного елемента; $д$ – величина деформації пружного елемента; F – вимірювана сила.

Похибки пружних елементів обумовлені старінням матеріал) пружного елемента, механічним гістерезисом, залежністю модуля пружності від температури.

Для безпосереднього вимірювання сили можуть застосовуватися магнітопружні та п'єзоелектричні перетворювачі.

Принципи дії і властивості цих перетворювачів розглянуті раніше, в розд. 2.

Один з можливих типів магнітопружного перетворювача зображений на рис. 8.29, *а.* Він являє собою феромагнітне осердя з обмоткою. Під дією вимірюваної сили F у матеріалі осердя виникає механічна напруга, що змінює його магнітну проникність, що у свою чергу, приводить до зміни магнітного опору осердя, а також до зміни індуктивності обмотки.

На рис. 8.29, *б* зображений магнітопружний перетворювач з двома обмотками. Такий перетворювач є трансформаторним. Вимірювана сила F перетворюється в механічну напругу осердя, що призводить до зміни його магнітної проникності. В результаті цього змінюється взаємна індуктивність між обмотками і ЕРС вторинної обмотки.

Кращі метрологічні характеристики має магнітоанізотропний трансформаторний перетворювач (рис. 8.30, *в).*

Магнітопровід такого перетворювача має вигляд куба, що має чотири отвори. В отворах вкладено обмотку живлення W_1 і вимірювальну обмотку W_2. Вони розташовані під кутом 45°до напрямку дії вимірюваної сили F і під кутом 90° одна до одної. За відсутності сили F магнітопровід такого перетворювача буде магнітоізотропним, тобто його магнітна проникність є однаковою у всіх напрямках. У цьому випадку магнітне поле, створюване

обмоткою живлення W_1, спрямоване паралельно виткам вимірювальної обмотки W_2 і не заходить у неї. У вимірювальній обмотці ЕРС не індукується.

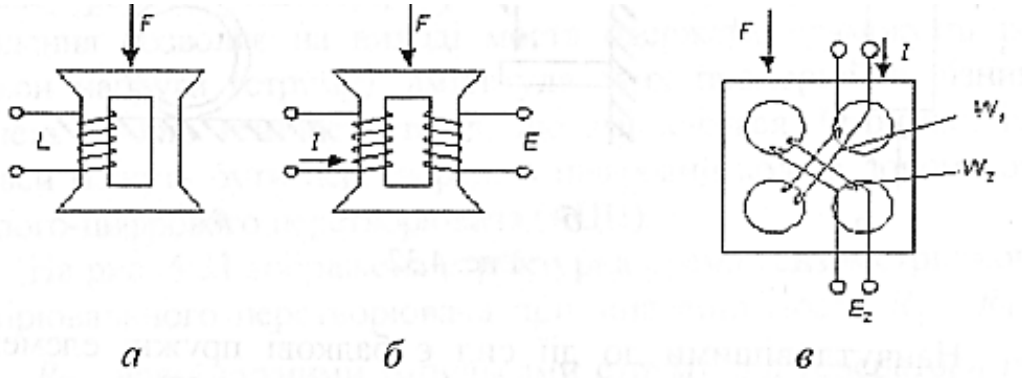


Рис. 8.29 Магнітопружні перетворювачі:

а – магнітопружний перетворювач з одною обмоткою, *б* – магнітопружний перетворювач з двома обмотками, *в* – магнітоанізотропний трансформаторний перетворювач

Під впливом вимірюваної сили F у магнітопроводі виникає механічна напруга, що змінює магнітну проникність

магнітопроводу в напрямку цієї напруги. Це змінює магнітний опір матеріалу в тому самому напрямку. Магнітний потік у магнітопроводі змінює свій напрямок, пронизує вимірювальну обмотку W_2, індукуючи в ній ЕРС E_2. пропорційну вимірюваній силі.

На похибку магнітопружних перетворювачів впливає нелінійність їхньої характеристики перетворення, вплив магнітного і механічного гістерезису, старіння матеріалу магнітопроводу.

При зміні температури змінюються магнітна проникність магнітопроводу і електричний опір обмоток, а це призводить до збільшення похибок перетворення.

Для зменшення похибок магнітопружні перетворювачі виготовляють диференціальними. Один з перетворювачів є робочим, а ідентичний йому другий перетворювач, на який не впливає вимірювана сила, призначений для компенсації впливу температури, зміни напруги живлення тощо.

Магнітопружні перетворювачі мають низьку точність (сума похибок вимірювання сили становить ≈ 3 %), вони широко використовуються для вимірювання великих сил (10^5... 10^6 Н). Їхня перевага - простота конструкції, надійність в роботі.

П'єзоелектричні динамометри засновані на використанні п'єзоелектричних перетворювачів сили в електричний заряд. Дія п'єзоелектричного перетворювача заснована на прямому п'єзоефекті, що полягає у властивості деяких кристалів (п'єзоелектриків) перетворювати механічні деформації в пропорційні їм електричні заряди на їхніх гранях. П'єзоелектрик являє собою пластинку, вирізану із кристала кварцу, на гранях якої є два ізольованих один від одного електроди.

На рис. 8.30 зображений п'єзоелектричний перетворювач сили типу ДТ. Як чутливий елемент у перетворювачі застосовані дві кварцові пластини 1,

розміщені в сталевому пружному корпусі 2. Зовнішні грані пластин з'єднані електрично з корпусом, а внутрішні з'єднані між собою паралельно, і вони ізольовані від корпуса самим кварцом. Заряд із пластини знімається за допомогою виводу 3 через коаксіальний кабель 4.

Вимірювана сила F прикладається до корпуса перетворювача. Діапазон перетворюваних зусиль дорівнює $0...2\cdot10^5$ Н.

Нелінійність статичної характеристики коливається в межах 1...3 %.

Особливістю п'єзоперетворювачів є дуже маленька вихідна потужність і великий внутрішній опір.

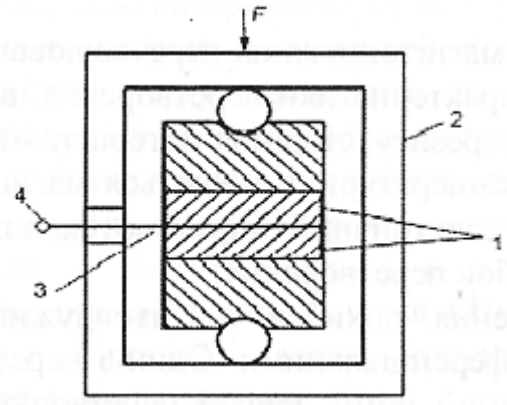


Рис. 8.30. П'єзоелектричний перетворювач сили типу ДТ:
1 – кварцові пластини, 2 – корпус, 3 – вивід, 4 – коаксіальний кабель

Для посилення вихідної напруги п'єзоелектричного перетворювача застосовують операційні підсилювачі з максимально можливим вхідним опором (не менше 10^{11} Ом).

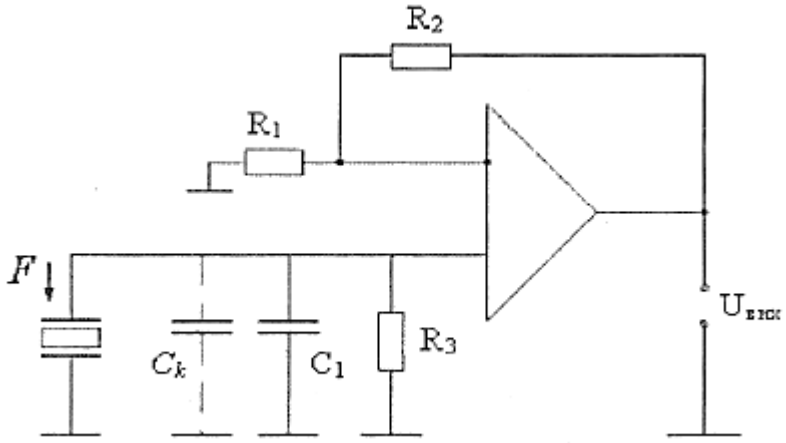


Рис. 8.31 Електрична схема вимірювального кола п'єзоелектричних перетворювачів

На рис. 8.31 наведена електрична схема вимірювального кола п'єзоелектричних перетворювачів, де C_k – паразитна ємність екранованого кабелю. Нестабільність параметрів кабелю. Наприклад, зміна електричної ємності C_k, викликана його вигином, впливом температури, вологості, впливає на вихідну напругу. Для зменшення цього впливу паралельно до входу підсилювача підключається ємність C_1.

Перевагою п'єзодинамометрів є їхня висока чутливість, висока швидкодія. Загальна похибка п'єзодинамометрів перебуває в межах 1 %.

Контрольні запитання

1. Що дозволяє виключити трипровідне підключення реостатного перетворювача до логометра?

2. Від чого залежить похибка вимірювання в схемі перетворення переміщення в цифровий код з використанням аналого- цифрового перетворювача напруги в код?

3. Для чого необхідна змінна ємність в схемі вимірювання переміщень з використанням одинарного індуктивного перетворювача?

4. Чого можна досягти, використовуючи первинні диференціальні індуктивні перетворювачі?

5. Поясніть призначення елементів у схемі вимірювання переміщень з використанням диференціального трансформаторного перетворювача?

6. Для чого використовуються трансформаторні перетворювачі (обертові трансформатори та сельсини)?

7. В яку величину дозволяють перетворювати кутові або лінійні переміщення магнітострикційні перетворювачі переміщення?

8. Що таке магнітострикція?

9. В чому полягає прямий ефект магнітострикції?

10. Поясніть призначення елементів у схемі магнітострикційного перетворювача?

11. Що є фізичною основою роботи магнітострикційних перетворювачів переміщення (МПП)?

12. Як відбувається перетворення кута повороту вала в часовий інтервал в схемі магнітострикційного перетворювача кутового переміщення в часовий інтервал?

13. Поясніть призначення елементів у схемі магнітострикційного перетворювача кутового переміщення в частоту імпульсів?

14. Яку перевагу мають магнітострикційні перетворювачі переміщень у цифровий код мають над магнітострикційними перетворювачами переміщень у часовий інтервал і в частоту?

15. Яким методом здійснюється у схемі магнітострикційного перетворювача кутових переміщень у цифровий код перетворення часового інтервалу ΔT_{U_n} в цифровий код?

16. Що покладено основу роботи пристрою для вимірювання швидкості переміщення в цифровий код?

17. Що може бути джерелом похибок перетворювача (імпульсного індукційного тахометра)?

18.Що є найпоширенішим методом вимірювання деформацій поверхні досліджуваного об'єкта?

РОЗДІЛ 9.

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОЇ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

9.1. Застосування мікропроцесорних вимірювальних приладів

Сучасні мікропроцесорні вимірювальні прилади – це засоби вимірювання, що здійснюють двосторонню взаємодію – з оператором і системою збирання інформації, і односторонню – з об'єктом вимірювання та навколишнім середовищем. Застосування у вимірювальних приладах МП, що мають можливості програмної обробки інформації, вводить у ці прилади певний «інтелект» і дозволяє не тільки поліпшити їх параметри, але й надати абсолютно нових якостей. Розглянемо деякі властивості вимірювальних приладів із мікропроцесорним керуванням.

Розширення вимірювальних можливостей. Застосування МП дозволяє істотно поповнити перелік параметрів сигналів і характеристик пристроїв. Це пов'язано передусім з використанням непрямих вимірювань.

Дійсно, за командою, одержаною з клавіатури, автоматично, відповідно до заданої програми, визначаються режими вимірювань, запам'ятовуються результати прямих вимірювань, виконуються потрібні обчислення і видається значення вимірюваної фізичної величини на дисплей. Хоча вимірювання за своєю природою залишаються непрямими, оператор сприймає їх як прямі, оскільки, підключивши прилад до об'єкта дослідження, безпосередньо одержує результат вимірювання. Ще ефективніші мікропроцесорні системи для сукупних вимірювань.

Поліпшення метрологічних характеристик. Наявність у приладі МП дозволяє скоригувати чи вилучити систематичні похибки і зменшити вплив випадкової складової похибки. Для усунення зміщення нуля, наприклад у цифровому вольтметрі, його вхідні затискачі замикають і заземлюють. При цьому значення, одержане на виході АЦП, характеризує рівень нуля. Воно запам'ятовується і вираховується з показань приладу. Випадкову складову похибки вимірювання не можна видалити, однак її вплив можна зменшити раціональною обробкою результатів спостережень. Багаторазові вимірювання з наступним усередненням їх результатів – ефективний спосіб зменшення впливу випадкової похибки на результат вимірювання.

Інваріантність, реалізована за допомогою МП, дозволяє додатковими вимірюваннями і операціями над ними так коригувати результат вимірювання, щоб у відомих межах зробити результат вимірювання нечутливим до зовнішніх умов, змін внутрішніх параметрів приладу та інформативних параметрів вимірюваного сигналу.

Сервіс. У процесі взаємодії приладу з оператором останньому надається значний сервіс як щодо зручної форми результатів вимірювання (наприклад, у

натуральних і логарифмічних одиницях, полярних або прямокутних координатах), так і щодо спрощення керування приладом. Легко реалізуються нормалізація результату та збільшення й інформативності зображення результату вимірювання через змінювання кольору, мигтіння, звукову сигналізацію тощо.

Організація вимірювальних систем. Прилад, що містить МП, зазвичай споряджений (або може бути доповнений) різноманітними інтерфейсами, що уможливлюють приєднування його до міні- або мікро-ЕОМ. Це дає змогу об'єднувати певну сукупність приладів у єдину вимірювальну систему. Особливо слід вирізнити можливість реалізації діагностики в мікропроцесорних вимірювальних приладах. Це визначає ступінь придатності приладу для введення його в автоматичні системи.

У процесі розроблення вимірювальних приладів і систем, які містять МП, найважчим є програмне забезпечення. Труднощі його розроблення зумовлено потребою опановувати спеціалістами основ програмування, високою вартістю програмного забезпечення, яка в кілька разів перевищує апаратурні затрати, і складністю налагоджувальної процедури, що потребує застосування спеціальних засобів налагодження технічних засобів спільно з програмним забезпеченням.

Обмежена швидкодія МП. Розглядаючи питання про застосування МП, слід ґрунтовно проаналізувати його швидкодію, з'ясувати, чи достатня вона для вирішення сформульованого завдання. При цьому треба орієнтуватися в довідкових даних, які характеризують швидкодію МП.

Труднощі вибору базового МП. Мікропроцесор – основний елемент мікропроцесорної системи, яка складає ядро мікропроцесорного вимірювального приладу. Промисловість виробляє багато типів МП, і кількість нових розробок зростає лавиноподібно. Достатня кількість різноманітних мікропроцесорних засобів, які не завжди з потрібною повнотою висвітлені в довідкових виданнях, хоча й надає великі можливості, але, поза сумнівом, ускладнює процедуру вибору базового МП для проектованого засобу вимірювання.

9.2. Автоматичні цифрові вимірювальні прилади

9.2.1. Загальні відомості

Із розвитком науки і техніки, інтенсифікацією виробничих процесів, упровадженням автоматичних систем керування технологічними процесами постають нові завдання щодо електричних вимірювань. Основні з них такі: підвищення точності, швидкодії та чутливості приладів для вимірювання як стабільних, так і змінних у часі величин; повна автоматизація процесу вимірювання, одержання результатів у вигляді кодів, призначених для введення в ЕОМ або в цифрові автоматичні системи керування. Ці завдання найчастіше успішно вирішують за допомогою цифрових засобів вимірювання, що видають результат вимірювання у дискретній формі, тобто у вигляді числа або цифрового коду.

Цифрові засоби вимірювання поділяють на ЦВП і АЦП.

Цифровим вимірювальним приладом називають засіб вимірювання, у якому неперервна вимірювана величина автоматично перетворюється в дискретну, піддасться цифровому кодуванню, а результат вимірювання подається у цифровій формі, зручній для візуального відліку. Для цього ЦВП оснащені відліковими пристроями.

Цифрові відлікові пристрої служать для подання результатів вимірювання у вигляді звичайних, зручних для зчитування оператором десяткових цифр. У цих пристроях застосовують кілька типів цифрових індикаторів, зокрема газорозрядні, світлодіодні та рідиннокристалічні.

Газорозрядні індикатори мають набір дротяних катодів, виконаних у формі десяти арабських цифр, і загальний сітчастий анод. Якщо напруга подається на анод і якийсь із катодів, то між ними виникає тліючий розряд у вигляді висвітленої відповідної цифри. Головна вада цих індикаторів – погана сумісність із низьковольтними інтегральними мікросхемами через високу робочу напругу (170...200В).

Світлодіодні індикатори використовують напівпровідникові інжекційні світловипромінювальні діоди, що випромінюють у видимій частині спектра. Колір проміння залежить від матеріалу Такі індикатори зазвичай мають сегментну структуру – кожна цифра формується висвічуванням певних сегментів. Світлодіодні індикатори мають високу яскравість, більшу довговічність, низькі робочі напруги (кілька вольтів), однак невеликі розміри обмежують їх застосування (у сучасних приладах застосовують досить широко).

У *рідиннокристалічних сегментних індикаторах* використовуються властивості деяких органічних речовин, названих рідкими кристалами, змінювати коефіцієнт заломлення під дією підведеної напруги. Конструктивно індикатори виконані у вигляді конденсатора, обкладками якого є струмопровідні електроди, нанесені у вигляді прозорих плівок на дві скляні пластинки. Тонкий шар рідкого кристала розміщено між цими пластинками. Індикатори не випромінюють власної енергії, вони працюють у відбитому світлі, використовуючи контраст між ділянками із прикладеною напругою й тлом; Вони дуже економні, але мають невисоку яскравість, а контрастність зображення залежить від зовнішнього засвічення.

Аналого-цифровий перетворювач не має відлікового пристрою, а вимірювальна величина видається на його виході у вигляді цифрового коду. Цей перетворювач зазвичай входить до складу ЦВП та вимірювально-інформаційних або керувальних систем. Цифровий вимірювальний прилад виконують у вигляді переносних і панельних приладів для встановлення на стандартних стійках. Особливістю ЦВП є дискретність за часом і за рівнем результатів вимірювання. Цифрове значення аналогової вимірюваної величини утворюється в процесі квантування та числового кодування, виконуваного ЦВП.

Квантуванням за рівнем називають процес перетворення неперервної величини в ряд однакових за значенням дискретних величин (ступенів квантування), який представляє всю вимірювану величину. При цьому но-

мінальному значенню вимірюваної величини $X_н$ відповідає $N_н$ ступенів квантування. Прикладом може бути декада резисторів, опори яких є дискретними рівнями, віддаленими один від одного на ступінь квантування. Отже, під цифровим кодуванням розуміють процес одержання кількості ступенів квантування, що відповідають вимірюваній величині, у прийнятій системі числення. Кількість дискретних рівнів ЦВП залежить від кількості розрядів відлікового пристрою та значення ступеня квантування, що може бути змінним для багатодіапазонних приладів.

Дискретність у часі ЦВП пояснюється тим, що виконання процесу перетворення *аналог – код – відлік* потребує певного часу.

Цифрові прилади мають ряд переваг, основні з яких такі: а) швидкодія, що досягає десятків мільйонів вимірювань за секунду; б) висока точність, що наближується до точності цифрових пристроїв ручного зрівноважування; в) відсутність суб'єктивних складових похибок відліку, що обмежують точність аналогових пристроїв; г) немає потреби у висококваліфікованих операторах; д) наявність кодованого виходу в ЦВП, що можна використовувати для зв'язку з ЕОМ, реєстрації та керування; е) можливість автоматичного введення поправки для запобігання систематичним похибкам; ж) можливість для зменшення випадкових похибок.

Поряд із цим існують і певні недоліки, властиві ЦВП: а) незручність порівняння показання цифрового приладу із заданим граничним значенням вимірюваної величини; б) потреба у високій лінійності перетворювачів (за наявності нелінійності в перетворенні вимірюваної величини виникає похибка, що дорівнює відхиленню реальної функції перетворення від лінійної); в) складність установлення та висока вартість. Застосування інтегральних схем знижує вартість приладів і підвищує їх надійність.

Аналого-цифрові перетворювачі застосовують у вимірювально-інформаційних системах для автоматизації досліджень, в АСК технологічними процесами складних об'єктів керування, у системах телевимірювання з кодовою формою переданого сигналу, в автоматичних системах для вивірювання вимірювальних приладів.

Цифрові вимірювальні прилади можна класифікувати за такими ознаками.

За призначенням – широко застосовуваними видами цифрових приладів є вольтметри постійного струму, цифрові омметри, вимірювачі відношення напруг, частотоміри та фазометри. Напругу змінного струму вимірюють спочатку точним перетворювачем змінної напруги в постійну, а потім цифровим вольтметром постійного струму.

За засобом перетворення вимірюваної величини в код ЦВП – прилади прямого перетворення та прилади зрівноваження.

Цифрові прилади прямого перетворення вимірювальної величини у код поділяють на прилади неперервної та циклічної дії. До перших належать прилади з кодувальними перетворювачами *кут – код,* у яких вимірювана електрична величина вимірювальним механізмом перетворюється у кут

повороту рухомої частини приладу, а кут повороту просторовим перетворювачем кодування – у код.

Прилади прямого перетворення циклічної дії перетворюють вимірювану величину в частоту, а інтервал часу – в кількість імпульсів або кут, який потім перетворюється в код.

Цифрові прилади зрівноваження вимірювану величину X зрівнюють з відомою компенсувальною величиною $X_к$. яка змінюється у часі. Процес порівняння продовжується до моменту зрівноваження величин X і $X_к$ що фіксується пристроєм порівняння і підсилювачем некомпенсації.

Цифрові прилади зрівноваження поділяють на прилади відстежувального та прилади розгортального зрівноваження. Компенсувальна величина приладів відстежувального зрівноваження $X_к$ за сигналом підсилювача некомпенсації змінюється реверсивно у бік зменшення або збільшення (якщо вимірювальна величина змінюється на значення, більше від половини ступеня квантування).

Цифрові прилади розгортального зрівноваження компенсувальну величину збільшують або зменшують повторюваними циклами. Кожне нове значення вимірюваної величини видається після завершення циклу.

Характер зміни $X_к$ приладів зрівноваження може бути лінійним, рівномірно-східчастим, нерівномірно-східчастим. Цифрові вимірювальні прилади розгортального зрівноваження з нерівномірно-східчастою зміною $X_к$ називають приладами порозрядного зрівноважування.

За принципом роботи ЦВП можна умовно поділити на часоімпульсні, частотно-імпульсні та кодоімпульсні.

Часоімпульсні ЦВП вимірювану величину перетворюють у пропорційний інтервал часу, що вимірюється цифровим квантувачем інтервалів часу. Часоімпульсні ЦВП бувають двох модифікацій: ті, що реагують на миттєве значення вимірюваної величини *x,* і ті, що вимірюють середнє значення за певний проміжок часу – інтегрувальні ЦВП.

Для *частотно-імпульсних ЦВП* характерно, щоб вимірювана величина x перетворювалася в пропорційну її значенню частоту появи імпульсів, яку вимірюють цифровим частотоміром. Цей принцип здебільшого використовують в комбінованих приладах.

Сутність принципу дії *кодоімпульсних ЦВП* полягає в тому, що вимірювана величина x послідовно немовби зрівноважується аналогічною їй фізичною величиною.

Залежно від типу використаних елементів ЦВП поділяють на електромеханічні та електронні. Перемикальні пристрої, що входять до вимірювального кола електромеханічних ЦВП, побудовані на контактних елементах (реле, крокові шукачі, крокові двигуни тощо) і мають малу швидкодію (не вище 3...4 вимірювань за секунду). В електронних ЦВП використовуються електронні елементи (діоди, транзистори, інтегральні схеми тощо), швидкодія яких може досягати 10^6 і більше вимірювань за секунду.

Найпоширеніші види вимірювальних приладів, що містять МП, – цифрові вольтметри і частотоміри. Для сучасного етапу розвитку «інтелектуальних»

приладів характерна корінна зміна принципів їх побудови: органічною частиною таких засобів вимірювання стала мікропроцесорна система.

9.2.2. Прилади подвійного інтегрування

Найпоширеніші і найбільш точні ЦВП – часоімпульсні прилади, що вимірюють середнє значення вимірюваної величини (прилади подвійного інтегрування). Ці прилади реалізують метод компенсації похибки за знаком, що дозволяє автоматично усунути вплив адитивної складової похибки вимірювання.

Суть цього методу компенсації похибки за знаком така. Якщо на вхід якого-небудь вимірювального перетворювача подати сигнал вимірювальної інформації X, то, пройшовши через перетворювач, він перетвориться в сигнал $Y=f(X)$ з деякою похибкою ΔY. Якщо ж цей сигнал X спочатку додати до деякого сигналу зсуву $X_{зс}$, що перевищує максимально можливе значення вхідного сигналу X_{max}, а потім відняти його від цього сигналу, то після подачі почергово цих нових сигналів на вхід вимірювального перетворювача на його виході теж сформуються два нові вихідні сигнали $Y_1 = f(X_{зс} + X)$ *і* $Y_1 = f(X_{зс} - X)$ з деякою похибкою ΔY .

Ця похибка матиме однаковий знак в обох випадках, оскільки вхідні сигнали $(X_{зс} + X)$ і $(X_{зс} - X)$ також одного знака. За умови, що функція перетворення $Y=f(X)$ лінійна, отримані сигнали Y_1 і Y_2 набудуть такого вигляду:

$$Y_1 = kX_{зс} + kX + \Delta Y;$$
$$Y_2 = kX_{зс} - kX + \Delta Y.$$

Віднімаючи від першого вихідного сигналу другий та розділивши отриману різницю на два, отримаємо:

$$Y_{вих} = (Y_1 - Y_2)/2 = (kX_{зс} + kX + \Delta Y - kX_{зс} + kX - \Delta Y)/2 = kX.$$

Таким чином, на виході пристрою буде сигнал, який вже не містить похибки ΔY:

$$Y_{вих} = kX.$$

На практиці цей метод можна реалізувати так. Якщо на вхід інтегратора, що містить інтегрувальний конденсатор, подати вхідний сигнал, який включає спочатку різницю між зсувною напругою $U_{зс}$ і вхідною напругою U_x, а потім – суму цих напруг, то інтегратор зарядиться за деякий постійний проміжок часу ΔT спочатку до напруги $(U_{зс} + U_x)k + \Delta U$, а потім за такий же проміжок часу

ΔT - до напруги $(U_{зс} - U_x)k + \Delta U$.

Подача на вхід інтегратора опорної напруги $U_{оп}$ протилежного знака спричинює розряджання інтегратора щораз після його зарядження до певного стану. А визначаючи за допомогою імпульсів каліброваної тривалості проміжки часу, за які інтегратор розрядиться до нульового стану, можна перетворити $(U_{зс} + U_x)k + \Delta U$ та $(U_{зс} - U_x)k + \Delta U$ у відповідні кількості імпульсів $N_{зс} + N_x + \Delta N$ і $N_{зс} - N_x + \Delta N$. Порахувавши отриману кількість імпульсів на реверсивному лічильнику спочатку у від'ємний бік, а відтак – у додатний, одержують на виході лічильника у чистому вигляді сигнал $2N_x$, що містить кількість імпульсів N_x яка залежить від вхідного

сигналу U_x. Розділивши далі цей сигнал $2N_x$ навпіл, одержують N_x, що відображає вхідний сигнал U_x без адитивної складової похибки.

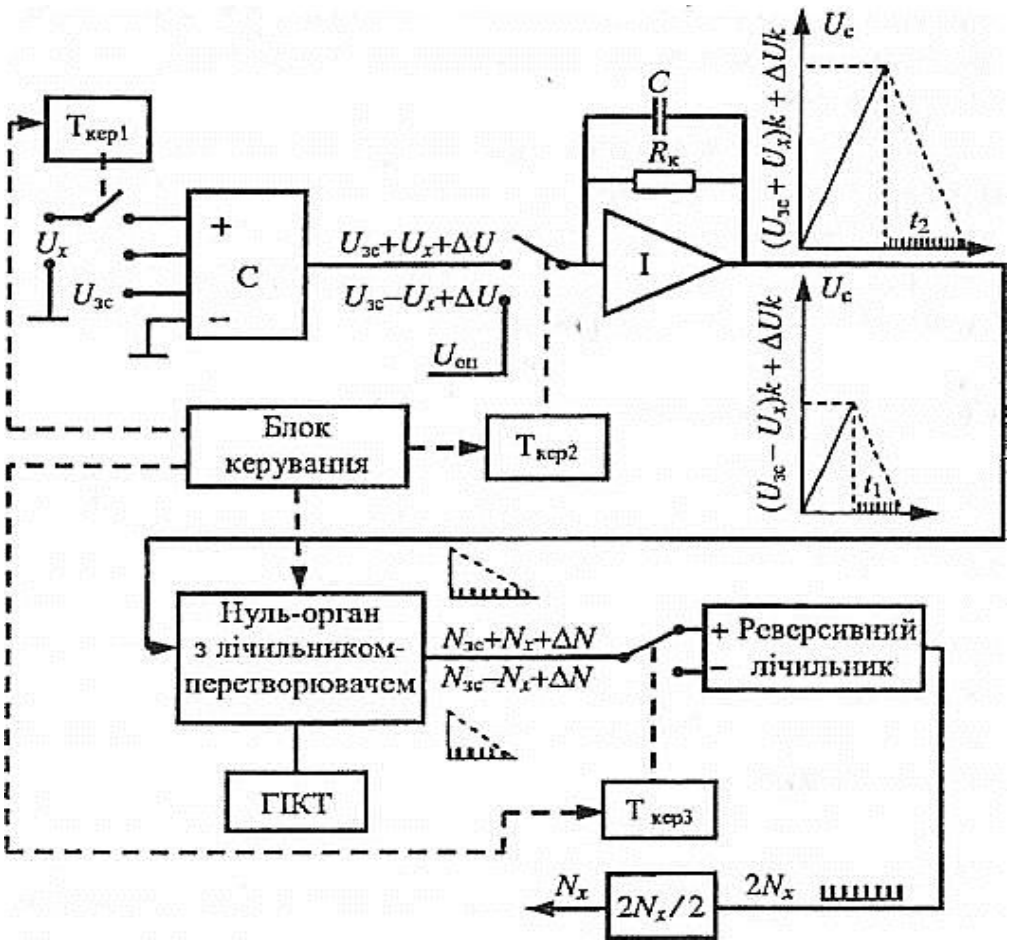


Рис. 9.1. Спрощена функціональна схема приладу подвійного інтегрування:
С – суматор; І – інтегратор; ГІСТ – генератор імпульсів каліброваної тривалості

Функціональну блок-схему пристрою можна подати у вигляді, зображеному на рис. 9.1. За командою $T_{кер1}$ блок керування по черзі подає вхідну напругу U_x на плюсовий і мінусовий входи суматора, на третій вхід якого подається напруга зсуву $U_{зс}$.

Складаючись спочатку з від'ємним, а потім із додатним значеннями вхідного сигналу, ця напруга на виході суматора перетворюється в сигнал, що містить спочатку від'ємне значення вхідного сигналу, а потім – додатне (оскільки зсувну напругу $U_{зс}$ вибирають більшою за максимально можливе значення вхідного сигналу, то похибка перетворення ΔU в обох випадках буде одного знака). Надходячи далі по черзі на інтегратор, вони заряджають його до сумарної напруги

$$U_c = k(U_{зс} + U_x) + k\Delta U \; \Delta U \; i \; U_c = k(U_{зс} - U_x) + k\Delta U \; \Delta U.$$

За командою того ж блока керування (через розряджання інтегратора за допомогою тригера керування $T_{кер2}$ до нульового стану та підключення щораз опорної напруги протилежного знака $U_{оп}$) вхідні сигнали на інтеграторі перетворюються у відрізки часу t_1 і t_2, які залежать від додатного та від'ємного значень вхідного сигналу U_x. За допомогою спеціальної схеми, що містить нуль-індикатор обнуління інтегратора (нуль-орган) і лічиль-

ник-перетворювач, ці два проміжки часу (t_1 і t_2) перетворюються в дві послідовності імпульсів $N_{зс}+N_x+\Delta N$ і $N_{зс}- N_x + \Delta N$, що містять корисний сигнал N_x з протилежними знаками і сигнал похибки ΔN одного знака. Стабільність проходження імпульсів забезпечується генератором імпульсів каліброваної тривалості.

Надходячи далі на додатний і від'ємний входи реверсивного лічильника, комутованого командами $T_{кер3}$ блока керування, ці імпульси перетворюються в послідовність Імпульсів $2N_x$, яка містить подвійний корисний сигнал. Поділивши далі на два ці послідовності імпульсів, одержують вимірюваний сигнал N_x, позбавлений адитивної складової похибки ΔU.

9.2.3. Цифрові вольтметри

Найпоширеніші ЦВП – це цифрові вольтметри. Розглянемо застосування МП у цифрових вольтметрах на прикладі вольтметра-омметра типу В7-39. Цей 5,5-розрядний цифровий прилад вимірює напругу постійного струму в діапазоні 0,2...200 В і опір до 2 мОм з похибкою не більше 0,007 % за температури (23±5)°С. Убудований МП керує індикацією, коригує похибки вимірювання, здійснює нелінійну цифрову фільтрацію сигналу, цифрове коригування дрейфу нуля, порівняння номінального й вимірюваного значень напруг або опорів.

Принцип роботи вольтметра, що працює в режимі вимірювання напруги, пояснює структурна схема (рис. 9.2).

За допомогою електронних ключів (К1, К2, К3) за командою МП вхід АЦП по черзі підключається до виходу подільника, джерела опорної напруги і «заземленої» клеми входу. Виконані на польових транзисторах електронні ключі забезпечують мінімальні значення спаду напруги на ключах у відкритому стані і струмів відпливу в закритому. Із вмиканням ключа К1 на вхід АЦП подається зразкова напруга $U_{оп}$ від джерела опорної напруги. На вході АЦП утворюється код Y_1, значення якого відповідає напрузі $U_{оп}$.

Цей код запам'ятовується МП. Потім вмикається ключ К2. На вхід АЦП подається напруга $U_с = k_д U_x$, *де* $k_д$ – коефіцієнт ділення вхідного подільника. Відповідний йому код Y_2 також вводиться в пам'ять МП. Коли замикається ключ К3, АЦП формує код Y_3, значення якого визначається деякою початковою напругою $U_{поч}$, яка еквівалентна дрейфові нуля підсилювача. Цей код також запам'ятовується МП. Вважаючи, що характеристика перетворення АЦП лінійна й описується рівнянням $Y = a + U_{поч}$, можна записати для кожного перетворення:

$$Y_1 = aU_{оп}+U_{поч};$$

$$Y_2 = aU_с+U_{поч} = ak_д U_x+U_{поч};$$

$$Y_3 = U_{поч},$$

де a – коефіцієнт перетворення АЦП.

Розв'язуючи цю систему з урахуванням того, що $U_с = k_д U_x$, знаходимо:

$$U_x = U_{оп}\,(Y_2-Y_3)/(k_д/(Y_1-Y_3)). \qquad (9.1)$$

Таким чином, за значеннями кодів Y_1, Y_2, Y_3, та $U_{оп}$, які введено у пам'ять, МП за алгоритмом (8.1) обчислює дійсне значення вхідної напруги U_x, код якого передається на цифровий індикатор приладу.

Із виразу (8.1) випливає, що значення U_x, яке відображається на індикаторі, не залежить від коефіцієнта a і $U_{поч}$, тобто неточність виставляння коефіцієнта перетворення, його тимчасова чи температурна зміна, а також зсув і дрейф нуля перетворювача не спричиняють похибки вимірювання напруги. Варто зауважити, що застосування розглянутого алгоритму не виключає похибки, зумовленої нелінійністю характеристик перетворення.

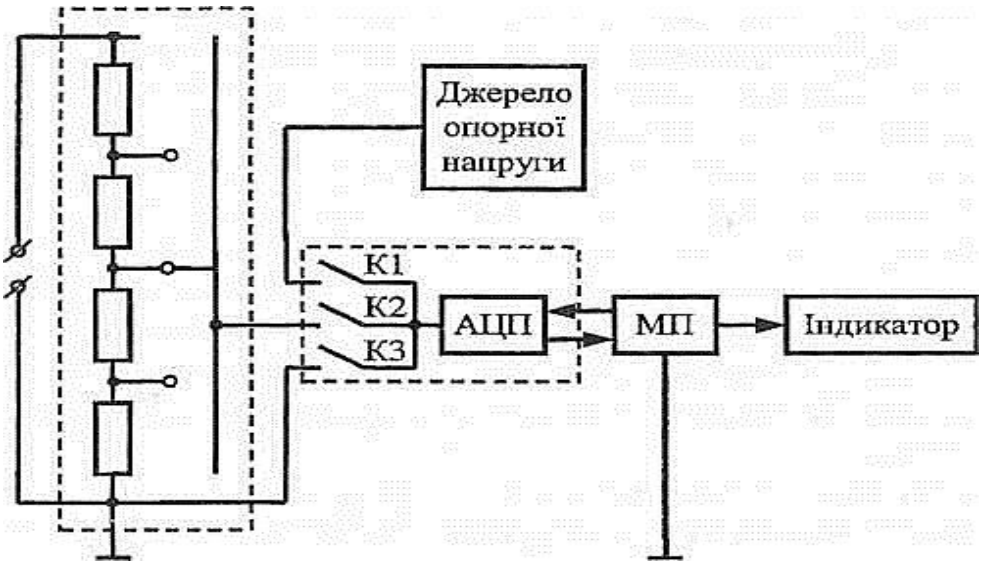


Рис. 9.2. Структурна схема цифрового вольтметра в режимі вимірювання напруги: К1, К2, К3 – ключі

Одна з найважливіших складових похибки, яка визначає довгочасну стабільність метрологічних характеристик приладу, – це стабільність джерела опорної напруги і вхідного резистивного подільника. Подільник виконано на основі гібридної тонкоплівкової мікросхеми таким чином, що температурний коефіцієнт відношення опору не перевищує $5 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$, а температурний коефіцієнт опору подільника – $15 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. Перша цифра визначає стабільність характеристик приладу під час вимірювання напруга, а друга – під час вимірювання опору. Основний елемент джерела опорної напруги – стабілітрон з інтегральним нагрівником, який підтримує постійною температуру кристала стабілітрона. Температурний коефіцієнт його напруги становить $2 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$.

Висока роздільна здатність вольтметра (1 мкВ) зумовлює чутливість приладу до паразитних сигналів низького рівня, наприклад у термо-ЕРС, яка виникає на його вході. Усунути складову похибки, спричинену цим чинником, можна за допомогою автоматичного цифрового коригування нульового рівня - натисканням відповідної клавіші на передній панелі. Отримане при цьому значення запам'ятовується і надалі враховується у розрахунках результатів вимірювання. Крім того, цей режим використовують для порівняння номінальних значень напруг або опорів. При цьому замість нульового вхідного сигналу запам'ятовується задане значення і надалі прилад відображає лише різницю між заданим і виміряним значеннями.

У приладі застосовується нелінійна цифрова фільтрація отриманих результатів. Потребу в такому режимі зумовлено вимогою стабільної індикації результатів вимірювань за досить високої швидкодії приладу. Цифрова фільтрація знижує не тільки дію зовнішніх завад, наявних у сигналі, але і вплив флуктуацій на поріг спрацьовування порівнювальних і граничних пристроїв, ява не можна відфільтрувати звичайними методами.

Цифрова фільтрація являє собою усереднення результатів декількох вимірювань. Кількість усереднених результатів залежить від установленої границі вимірювання. Так, на межі 200 мВ обчислюється середнє значення з восьми результатів, при цьому вплив шуму і завад зменшується у $\sqrt{8}$ разів. Мікропроцесор обчислює середнє значення наприкінці кожного циклу вимірювання, тобто кожні 200 мс. На табло індикатора видається «поточне» середнє значення, отримане за даними останнього результату вимірювання і семи попередніх значень, записаних у пам'яті МП. У кожному наступному циклі вимірювання перше із семи попередніх значень відкидається і середнє значення обчислюється з урахуванням останнього отриманого результату.

У разі різких змін вхідного сигналу усереднення за результатами восьми вимірювань не виявляється достовірним, через що у випадку зміни вхідного сигналу (під час останнього вимірювання) на понад 10 одиниць молодшого розряду усереднення не робиться. Коди порівнюються МП автоматично. У діапазоні вимірювання до 2 В усереднення виконується за результатами чотирьох вимірювань, а відповідне граничне значення дорівнює трьом одиницям молодшого розряду. Цей спосіб дозволяє забезпечити стабільність показань індикатора під час вимірювання постійних напруг за сумарного часувстановлення показань 0,5 с замість 1,5 с у разі використання аналогових фільтрів.

Вольтметр В7-39 має високу точність. Наприклад, похибка вимірювання напруги постійного струму становить близько 0,02 %. Убудований МП виконує такі операції: коригування похибок; керування й обчислення під час математичного опрацювання результатів вимірювань; уведення і збереження програми; тестовий контроль і часткову діагностику відмов спеціальної апаратури. Програма «Статистичний аналіз» дозволяє обчислювати середнє значення вимірюваної величини, її дисперсію та середньоквадратичне відхилення.

9.2.4. Цифрові програмовані багатоканальнівимірювальні прилади (реєстратори даних)

Застосування у вимірювальній техніці МП і мікро-ЕОМ зумовило появу нового класу цифрових програмованих багатоканальних вимірювальних приладів; їх ще називають логерами (реєстраторами даних). Узагальнену структурну схему такого приладу показано на рис. 9.3.

Як видно, типовий логер побудовано на концепції шинної організації за блоково-модульним принципом. Тут усі елементи вимірювальної системи розглядаються як зовнішні пристрої для МП або мікро-ЕОМ. Логери можуть містити до 100 вимірювальних каналів, опитуваних синхронно або

асинхронно, причому частота опитування може змінюватись у широких межах. Убудований МП керує роботою приладу відповідно до заданої програми. Програма керування більшості сучасних логерів зберігається на дисках або стрічках.

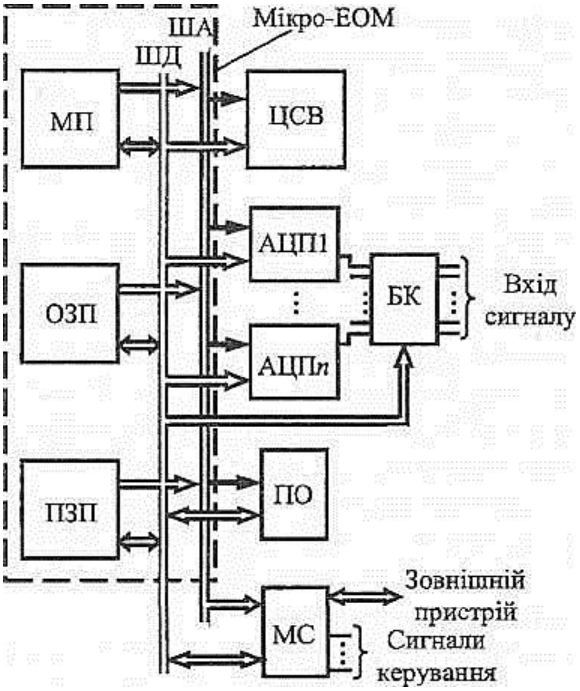


Рис. 9.3. Узагальнена структурна схема реєстратора даних:
ЦСВІ – цифрова система відображення інформації; БК – блок комутатора; ПО – пульт оператора; МС – модуль сполучення

Останнім часом значного поширення набули ЦВП, побудовані на базі персональних ЕОМ, обчислювальні можливості та й сама архітектура яких виявилися достатньо пристосованими для цього. Виникла «надлишкова» обчислювальна потужність і добре розвинені структури персональних комп'ютерів дозволили раціонально поєднати апаратні та програмні засоби в процесі створення нових ЦВП.

9.3. Застосування цифрової обчислювальної техніки в засобах для технологічних вимірювань

Під час виконання технологічних вимірювань інколи виникає потреба в різних обчислювальних операціях, пов'язаних з визначенням значень вимірюваних величин і похибок вимірювань. Окрім того, для раціональної організації процесу автоматичного контролю технологічних параметрів потрібно виконувати різні логічні операції. Ці завдання вирішують за допомогою засобів обчислювальної техніки – обчислювальних пристроїв. Обчислювальні пристрої підрозділяють на пристрої безупинної (аналогові) і пристрої дискретної (цифрові) дії.

В аналогових обчислювальних пристроях значення величин, над якими виконуються математичні операції, змінюються безупинно. Вони зображуються у певному масштабі у вигляді інших фізичних величин, наприклад напруги, струму, тиску стиснутого повітря тощо. Результат виконання аналоговими пристроями математичних операцій з'являється одразу після введення вхідних даних. Аналогові обчислювальні пристрої вирізняються простотою і порівняно невисокою вартістю. їх уже давно і широко застосовують у засобах технологічних вимірювань для обробки сигналів вимірювальної інформації, однак через обмежену точність (похибка не менша за ±0,1...0,5%) їх застосування виявляється доцільним тільки для реалізації відносно простих алгоритмів.

У цифрових обчислювальних пристроях значення величин, над якими виконуються математичні операції, набувають вигляду набору цифр. Кожна цифра, що відповідає визначеному розряду числа, встановлюється на окремому цифровому елементі: тригері, рахунковому колесі тощо. У процесі виконання математичних операцій значення вхідних даних не змінюються. Нові вхідні дані вводяться в цифровий обчислювальний пристрій лише через певний час, потрібний для виконання обчислень. Таким чином, цифрові обчислювальні пристрої працюють переривисто в часі (дискретно). Цифрові обчислювальні пристрої вирізняються практично необмеженою точністю, великими логічними можливостями і значною швидкодією.

Можна виокремити два види цифрових обчислювальних пристроїв як засоби вимірювань: пристрої з незмінюваною програмою обробки інформації та пристрої зі змінюваною програмою обробки інформації.

Пристрої з незмінюваною програмою обробки інформації мають незмінну структуру, що визначається прийнятою програмою обробки інформації, складеною відповідно до реалізовуваних функцій. Будь-яке змінювання реалізовуваної функції потребує змінювання структури обчислювального пристрою. Такі цифрові обчислювальні пристрої, як і аналогові, мають вузьку спеціалізацію.

Цього недоліку позбавлені цифрові обчислювальні пристрої зі змінюваною програмою обробки інформації, які дозволяють розв'язувати будь які обчислювальні задачі. Ці пристрої являють собою цифрові електронні обчислювальні машини – ЕОМ, міні-ЕОМ, мікро-ЕОМ, МП.

9.3.1. Уведення вимірювальної інформації про технологічні параметри в пристрої цифрової обчислювальної техніки

Сучасні засоби вимірювань технологічних параметрів мають вихідні сигнали у вигляді постійного струму, частоти чи тиску, тобто є аналоговими. Для введення цих сигналів у засоби цифрової обчислювальної техніки потрібно використовувати відповідні перетворювальні (узгоджувальні) пристрої. Загальне, вирішуване при цьому завдання, полягає в перетворенні сигналів ПВП в електричний кодовий сигнал, який сприймається засобами обчислювальної техніки. Найбільш типові структурні схеми пристрїв, використовуваних для узгодженого функціонування засобів вимірювань

технологічних параметрів і засобів обчислювальної техніки, показано на рис. 9.4.

Електричний сигнал постійного струму *I* перетворюється у кодовий за допомогою АЦП (рис. 9.4, *а,б*), а сигнал частоти *f* – за допомогою частотно-цифрового перетворювача (рис. 9.4, *в,г*).

Якщо ці перетворювачі використовують для перетворення сигналів декількох ПВП (наприклад, ПВП1-ПВП*n*), то сигнали по черзі підводяться до АЦП (рис. 9.4, *б*) через електричний комутатор.

Для перетворення сигналів тиску *p* стиснутого повітря, вироблюваних пневматичними ПВП, зазвичай використовують попереднє перетворення тиску в електричний сигнал постійного струму (рис. 9.4, *д,е,ж*) за допомогою пневмоелектричних перетворювачів. При цьому, якщо один пневмоелектричний перетворювач і один АЦП застосовуються для перетворення сигналів декількох ПВП, то почергове підключення ПВП до пневмоелектричного перетворювача здійснюється за допомогою пневматичного комутатора (рис. 9.4,*е*). Якщо ж для перетворення сигналу кожного пневматичного ПВП використовується індивідуальний пневмоелектричний перетворювач, то за допомогою електричного комутатора

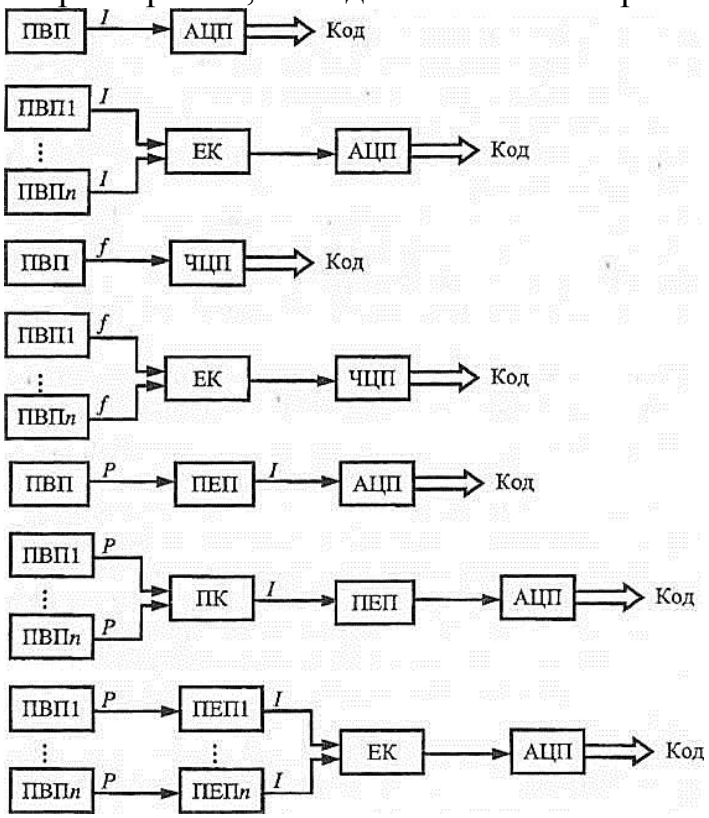


Рис. 9.4. Структурні схеми пристроїв узгодження:

ЕК – електричний комутатор; ЧЦП – частотно-цифровий перетворювач; НЕП – пневмоелектричний перетворювач; ПК – пневматичний комутатор

(рис. 9.4, *ж*) по черзі підключаються ПВП1-ПЕП *n* до АЦП.

Кодовий сигнал уводиться в засоби обчислювальної техніки за допомогою приладових інтерфейсів.

Інтерфейс для засобів вимірювань (*приладовий інтерфейс*) призначено для обміну інформацією між засобами вимірювань, які мають вихідний сигнал у вигляді відповідного коду, і засобами цифрової обчислювальної техніки.

9.3.2. Застосування засобів цифрової обчислювальної техніки у приладах для технологічних вимірювань

Сучасний етап розвитку приладобудування характеризується широким використанням у складі засобів вимірювань обчислювальних пристроїв, побудованих на базі МП – мікропроцесорних систем (МПС). Застосуванням таких систем у вимірювальних пристроях досягають двох цілей: розширюють функції вимірювальних пристроїв і поліпшують їхні характеристики.

Використання МПС у засобах електричних вимірювань дозволяє по новому підійти до їх компонування й алгоритмів функціонування, збільшити інформаційні можливості, підвищити точність, надійність і швидкодію.

У галузі технологічних вимірювань ведеться пошук раціональних рішень і розроблення вимірювальних пристроїв із вбудованими МПС. У загальному випадку МПС у складі вимірювальних пристроїв дозволяє:

обчислювати значення вимірюваної величини за заданим алгоритмом;

виконувати статистичну обробку результатів вимірювання;

аналізувати контрольований параметр (на максимум, мінімум і т. ін.);

коригувати статистичні характеристики (на підставі методів підвищення точності) засобів вимірювання;

виконувати автоматичне самоградуювання та самоперевірку (зокрема, відновлення коефіцієнта перетворення і коригування нульового рівня сигналу);

забезпечувати зв’язок із системою, до якої підключено вимірювальний пристрій;

виконувати самодіагностику;

керувати вимірюваннями;

виконувати стабілізацію чи програмне регулювання режимних параметрів засобу вимірювання.

Однак попри нові позитивні якості МПС у складі вимірювальних пристроїв істотно ускладнюють ці пристрої. Як приклади розглянемо структурні схеми, використовувані для створення вимірювальних пристроїв технологічних параметрів (рис. 9.5).

Найбільшого застосування набула схема, яка реалізує метод допоміжних вимірювань (рис. 9.5, *а*). У роботі вимірювального пристрою, побудованого за такою схемою, використовується інформація про основний (вимірюваний) параметр $П_х$ та допоміжні $П_{х1}$, $П_{х2}$ параметри – впливові чинники (про навколишню температуру, атмосферний тиск тощо). Урахування за допомогою МПС через функції впливу дії цих чинників забезпечує зменшення похибки засобу вимірювання. За такою схемою будують засоби для вимірювання тиску, температури, рівня, витрати тощо. При цьому основний

і допоміжний параметри можна вимірювати методами прямого або зрівноваженого перетворення.

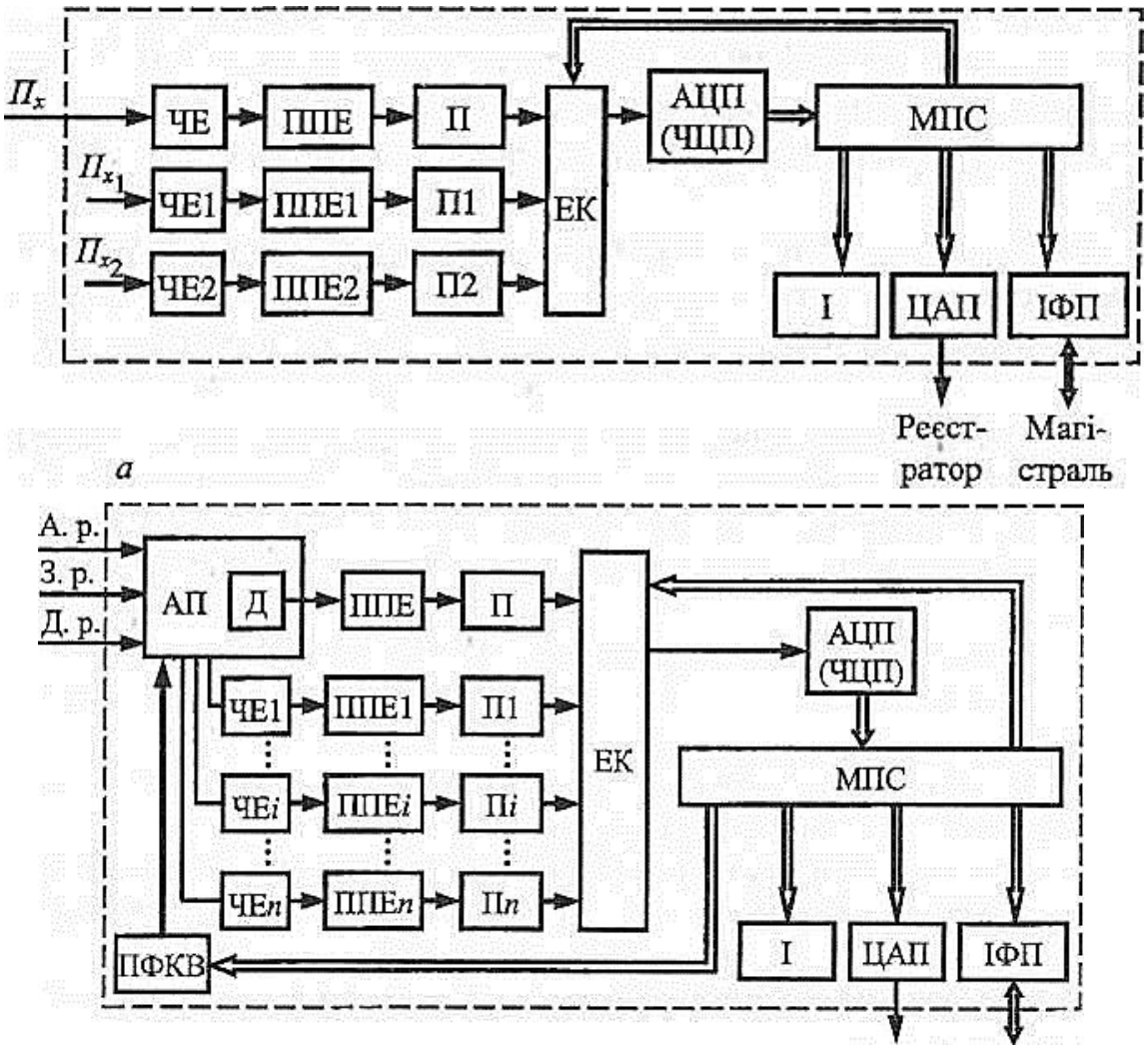


Рис. 9.5. Структурні схеми пристроїв із вбудованою МПС для вимірювання теплотехнічних (*а*) та якісних (*б*) параметрів:

Пх – основний (вимірюваний) параметр; Пх1,Пх2 – допоміжні параметри; АП – аналітичний пристрій; Д – детектор; ЕК – електричний комутатор; А. р. – аналізована речовина; З. р. і Д. р. – зразкова та допоміжна речовини; І – індикатор цифровий; ІФП – інтерфейсний пристрій; П, П1-Пn – підсилювачі; ППЕ, ПЛЕ1-ППЕn – проміжні перетворювальні елементи; ПФКВ – пристрій формування керувальних впливів; ЧЕ, ЧЕ1-ЧЕn – чутливі елементи;ЧЦП – частотно-цифровий перетворювач

Найефективнішим є застосування МПС у засобах аналітичної техніки, коли поряд з вимірюванням основного та ряду допоміжних параметрів потрібно керувати вузлами аналітичного пристрою і виконувати у великому обсязі обчислення, пов’язані з обробкою інформації.

Узагальнену структурну схему автоматичного аналізатора якості показано на рис. 9.5, *б*. В аналізаторах, які виконують вимірювання одного

параметра, основний сигнал вимірювальної інформації формується в аналітичному пристрої за допомогою того чи іншого детектора.

Для зменшення похибки аналізатора і забезпечення нормального його функціонування за допомогою низки ЧЕ і вимірюються параметри, за значеннями яких коригується статична характеристика, стабілізуються режимні параметри аналітичного пристрою та виконуються потрібні для проведення аналізу його перемикання.

Функції стабілізації та перемикання реалізуються МПС через пристрій формування керувальних впливів. В аналітичний блок можна подавати (крім аналізованої та допоміжних речовин) зразкову речовину для забезпечення періодичного самоградуювання аналізатора.

Потрібні для керування роботою цих пристроїв (і стабілізації їх режимних параметрів) сигнали формуються МПС і надходять до аналітичних пристроїв через пристрій формування керувальних впливів.

Останнім часом МП дедалі ширше оснащують не лише вторинні прилади та проміжні перетворювачі, а й ПВП.

Мікропроцесорні термоперетворювачі (сенсори) ТХАУ Метран-271МП, ТСМУ Метран-274МП, ТСПУ Метран-276МП (промислова група «Метран») призначено для вимірювання температури рідких і газоподібних речовин, для яких матеріал захисних арматур є корозієстійким. Чутливий елемент і вбудований у головку ПВП мікропроцесорний перетворювач перетворюють вимірювану температуру в уніфікований вихідний сигнал постійного струму, що дає змогу будувати АСК технологічних процесів без додаткових нормувальних перетворювачів.

Мікропроцесорні термоперетворювачі мають деякі переваги над традиційними термоперетворювачами з уніфікованим вихідним сигналом:

зниження витрат на проектування систем автоматизації;

можливість змінювання діапазону перетворених температур і як результат скорочення витрат у 5-7 разів на утримання парку запасних ПВП температури;

оперативність проведення ремонтних і профілактичних робіт як результат безперервної самодіагностики;

зменшення простоїв устаткування й підвищення надійності виробничого процесу;

підвищення точності вимірювань (зведена похибка до ±0,15%);

наявність убудованого пристрою самокалібрування (якщо змінюється температура аналого-цифрова вимірювальна схема автоматично самокалібрується, порівнюючи динамічні результати вимірювання з даними надзвичайно стабільних і точних внутрішніх еталонних елементів);

сигналізація обриву чи короткого замикання первинного перетворювача (сенсора);

можливість переналаджування номінальної статичної характеристики у випадку заміни ЧЕ на інший тип;

мінімізація похибки вимірювання за рахунок температурної компенсації – додаткова похибка внаслідок впливу температури навколишнього

середовища в 5-10 разів менша, ніж в аналогових перетворювачах з уніфікованим вихідним сигналом;

Кожен мікропроцесорний ПВП випробовується в діапазоні навколишніх температур від мінус 40 до +70°С. Випробувальна установка на базі комп'ютера вивчає, як мікропроцесорний перетворювач реагує на змінювання температури навколишнього повітря. Отримані дані записуються в пам'ять мікропроцесорного перетворювача. Крім того, мікропроцесорний перетворювач має вбудований ТО для вимірювання температури навколишнього повітря в реальних умовах експлуатації. Спираючись на виміряні та записані в пам'ять дані, МП вносить у вихідний сигнал термоперетворювача поправку на вплив температури навколишнього повітря.

лінеаризація МП номінальної статичної характеристики сенсора для підвищення точності вимірювань;

сигналізація виходу сигналу 4.. .20 мА (20.. .4 мА) за межі допустимого діапазону в процесі налагодження та виконання пусконалагоджувальних робіт;

можливість організації інверсного виходу 20.. .4 мА;

наявність убудованого фільтра радіозавад.

Програмне забезпечення мікропроцесорниих перетворювачів дозволяє виконувати: тестування та конфігурування ПВП (за допомогою спеціального конфігуратора); діагностику ПВП, контуру живлення, аналогового сигналу безпосередньо на місці встановлення термоперетворювача; уведення додаткової компенсації під час налагодження ПВП під температуру навколишнього середовища.

9.3.3. Застосування засобів цифрової обчислювальної техніки у вимірювальних системах

Вимірювальні системи тепер широко застосовують у системах автоматичного контролю, регулювання та керування технологічними процесами. Вимірювальні системи з декількома ПВП та одним вторинним приладом мають обмежені функціональні можливості й ускладнюють засоби автоматичного регулювання параметрів.

Застосування вимірювальних систем з індивідуальним вторинним приладом для кожного ПВП у сучасних технологічних процесах, де потрібно вимірювати сотні параметрів, пов'язане з істотним збільшенням площі щитів контролю і керування та ускладненням роботи оператора через збільшений обсяг інформації. Навіть дуже тренований оператор не може належним чином опрацювати й використати отриману такими системами інформацію. Тому часто цим займаються одночасно декілька операторів.

Підвищення потужностей технологічних установок, значне збільшення в зв'язку з цим кількості вимірюваних параметрів, розвиток цифрової техніки обробки інформації і перехід до оптимізації процесів завдяки застосуванню АСК технологічними процесами визначили нові тенденції розвитку вимірювальних систем, застосування у технологічних процесах поряд із системами автоматичного контролю систем технічної діагностики та систем

розпізнавання зразків, об'єднаних поняттям *«вимірювальна інформаційна система»* (ВІС) – сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів контролю, діагностування, ідентифікації (розпізнавання образів) та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної й інших видів інформації.

У галузі вимірювальної техніки, пов'язаної з ВІС, використовують такі поняття:

вимірювально-обчислювальна система – ВІС, до складу якої входить програмно-керований цифровий обчислювальний пристрій (МП, мікро- чи міні-ЕОМ і т. ін.);

вимірювально-обчислювальний комплекс – універсальне ядро ВІС, що включає всі засоби цифрової обробки, збереження, реєстрації та відображення вимірювальної інформації, крім ПВП.

Навіть однотипні системи контролю з приблизно однаковим набором технічних засобів можна реалізовувати на базі різних функціональних схем. На рис. 9.6 показано функціональні схеми трьох автоматичних систем неруйнівного контролю якості: паралельної (рис. 9.6, *а*), послідовної (рис.9.6, *б*) та сканувальної (рис. 9.6, *в*) дій.

Кожна із систем включає один або кілька ПВП, що перетворюють вхідні фізичні величини в уніфіковані електричні сигнали, АЦП, лінії зв'язку з приймальними перетворювачами на кінці, ЕОМ або МП для нагромадження та оброблення інформації, оперативні запам'ятовувальні пристрої, пристрої відображення інформації.

У системах паралельної дії перед ЕОМ додатково підключено мультиплексор для передавання масивів інформації від вимірювальних каналів до ЕОМ. У системах послідовної дії з меншою кількістю апаратних засобів комутатор по черзі підключає до АЦП виходи ПВП. У сканувальних системах потрібну інформацію від об'єкта отримують за допомогою сканера та одного ПВП, який може бути одночасно і випромінювачем якогось поля (наприклад, акустичного, оптичного, радіохвильового, теплового), і його приймачем (наприклад, із розподілом цих функцій у часі).

Усі ці системи містять підсистеми збирання та первинного оброблення інформації (ПВП, комутатори, АЦП), канали зв'язку, підсистеми вторинної обробки інформації (ЕОМ або МП), пристрої (чи підсистеми) відображення інформації. Робота кожної з автоматичних систем грунтується на отриманні інформації, надаваної використаними в них засобами вимірювальної техніки, які водночас є інформативними засобами вимірювальних систем або підсистем, вимірювальних каналів, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів (зокрема ПВП).

У разі автоматизації технологічних процесів, коли завдання вимірювання технологічних параметрів вирішують у нерозривному зв'язку із завданнями регулювання та керування, ВІС створюються у межах АСК технологічними процесами на базі керувальних електронних обчислювальних машин чи керувальних обчислювальних комплексів, які входять до складу АСК технологічними процесами.

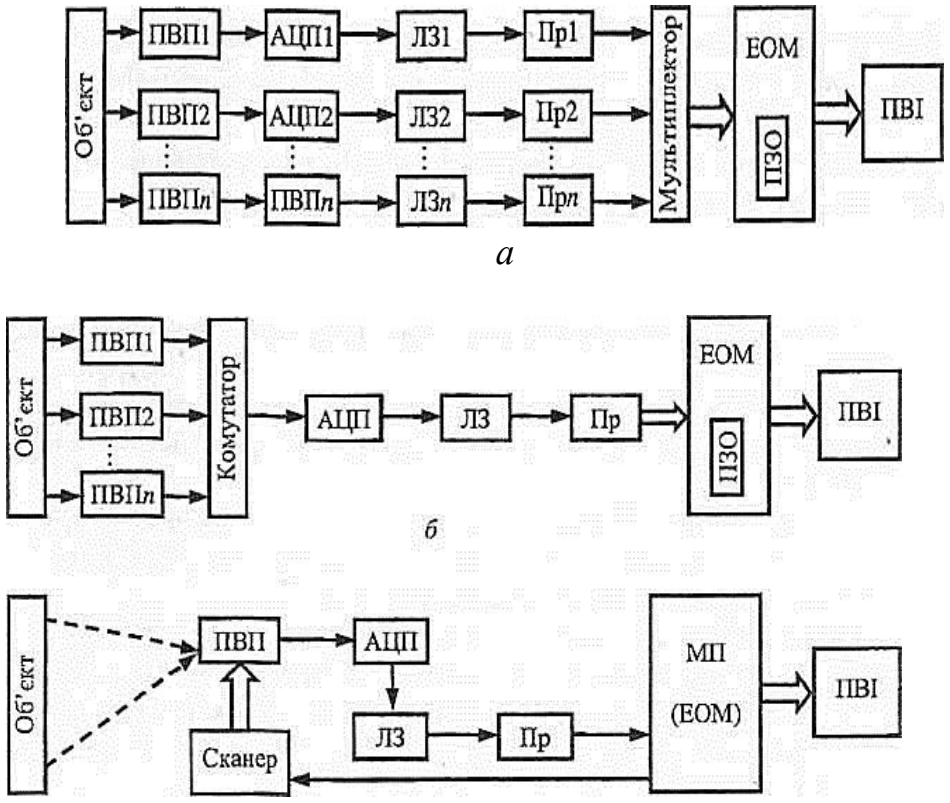


Рис. 9.6. Функціональні схеми автоматичних систем неруйнівного контролю паралельної (*а*), послідовної (*б*) та скандувальної (*в*) дій:

ЛЗ – лінії зв'язку; Пр – приймальні перетворювачі;
ПВІ – пристрої відображення інформації

Широке застосування в сучасних ВІС і керувальних обчислювальних комплексах МП, міні- та мікро-ЕОМ, побудованих за магістрально-модульною структурою, забезпечує простоту нарощування апаратних засобів і можливість змінювати завдання, розв'язувані ВІС або керувальними обчислювальними комплексами, не тільки змінюючи їх технічний склад, а й за допомогою програмування. Тому всі різновиди ВІС (вимірювальні системи збирання й оброблення інформації, системи автоматичного контролю, технічної діагностики та ідентифікації, тобто розпізнавання технічних зразків) мають, посутно, однакову структуру, узагальнений вигляд якої зображено на рис. 9.7.

Первинна вимірювальна інформація про параметри технологічного процесу як об'єкта контролю чи керування, виробляється ПВП. Сигнали ПВП уніфікуються та перетворюються за формою і видом енергії (наприклад, пневматичні перетворяться в електричні) у блоці аналогових проміжних перетворювачів. Уніфіковані аналогові електричні сигнали в блоці АЦП перетворюються в код і надходять у цифровий пристрій.

Блок ЦАП служить для формування компенсувальних впливів у процесі перетворювання вимірюваних величин. Усі функціональні блоки ВІС можуть з'єднуватися між собою через стандартні інтерфейсні пристрої, а загальне керування ВІС здійснюється пристроєм керування. В окремих випадках

реалізації деяких блоків ВІС може не бути. Наприклад, якщо вимірювальні пристрої ВІС мають вихідний сигнал у вигляді коду, то немає потреби включати до її складу аналогові проміжні перетворювачі та блок АЦП.

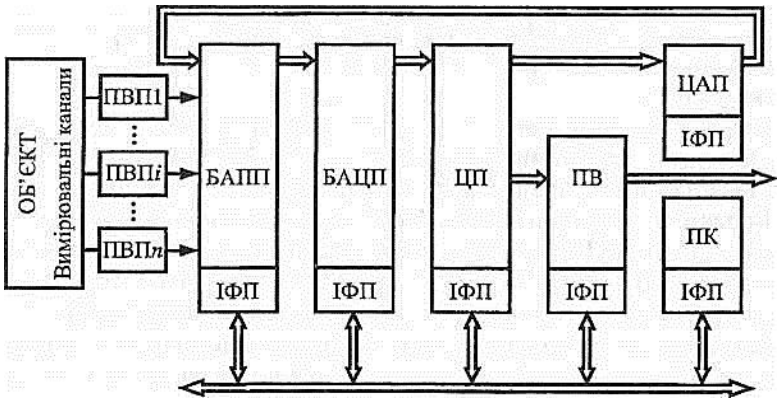


Рис. 9.7. Структурна схема інформаційно-обчислювальної системи:
ІФП – інтерфейси пристрої; ПВ – пристрої виведення; ПК – пристрій керування; ЦП – цифровий пристрій
БАПП – блок аналогових проміжних перетворювачів; БАЦП – блок АЦП;

Для автоматизації технологічних процесів ВІС виконують функції вимірювання, контролю і технічної діагностики, використовуючи вимірювальну інформацію, що надходить від ПВП (ці функції реалізуються програмними засобами вимірювально-обчислювального комплексу). Одна з основних функцій ВІС – збирання й оброблення вимірювальної інформації. При цьому ВІС забезпечують виконання як прямих, так і непрямих вимірювань, зокрема розрахунок техніко-економічних показників процесу.

Як приклад використання МП у ВІС і керувальних обчислювальних комплексах розглянемо роботу мікропроцесорного пристрою для вимірювання та регулювання витрати. В описаних вище аналогових пристроях вимірювання витрати з використанням звужувальних пристроїв (значення густини газу, пари та води) обчислюються за змінами тиску й температури тільки приблизно, позаяк змінювання значень коефіцієнта стисливості газу *K,* коефіцієнта розширення **ε** газу та пари у звужувальному пристрої, коефіцієнта витрати α для всіх середовищ (або коефіцієнта витікання) не враховуються, так само приблизно задаються значення коефіцієнтів $k_{ш}$ і $k_{п}$. Високоточне обчислення цих коефіцієнтів стало можливим тільки за допомогою мікропроцесорних пристроїв із цифровою обробкою даних вимірювань.

Структурну схему для однієї труби, характерну для всіх сучасних мікропроцесорних витратомірів, показано на рис. 9.8. На схемі зображено переважний склад таких пристроїв-витратомірів.

Коректори газу (інакше обчислювачі, лічильники та газолічильники) призначено для обчислення витрат газу, наприклад, за формулами Міждержавного стандарту ГОСТ 8.563-97 з урахуванням змінюваних параметрів (тиску, температури, вологості) за сигналами витратоміра. Здебільшого це дифманометри витратомірів зі звужувальними пристроями та напірними трубками. Однак інколи застосовують турбінні та вихрові витратоміри.

Додатково в коректор можна вводити сигнали від калориметра газу та густиноміра.

Коректори газу застосовують як для технологічного контролю, так і у складі вузлів комерційного обліку природного й інших газів (кисню, азоту, повітря та ін.). Подібні коректори можуть також обслуговувати три трубопроводи, які можуть належати різним споживачам. У різних трубопроводах може бути різний склад природного газу та різні типи датчиків витрати, тиску і температури, густини та питомої теплоти згоряння. Коректори розраховані на тиск газу в трубопроводах 0,05... 12 МПа, температуру – мінус 30...+65 °С, уміст вологи в об'ємних частках – до 0,15.

До таких коректорів можна підключати до восьми датчиків із сигналами постійного струму, три – з частотними сигналами до 1000 Гц і три термоперетворювачі опору (ТОМ і ТОП) із R_0 50 і 100 Ом. Для розширення діапазону вимірювання до кожного звужувального пристрою можна приєднувати три дифманометри, перемикання яких здійснюється автоматично.

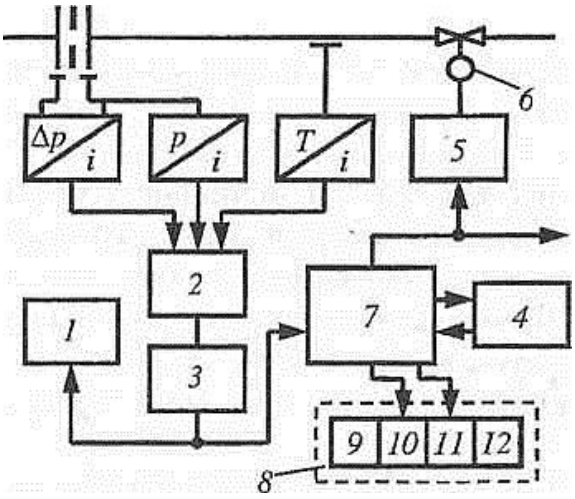


Рис. 9.8. Структурна схема пристрою для вимірювання та регулювання витрат за допомогою ЕОМ:

1 – один або кілька рядків цифрового табло для індикації вимірюваних і обчислюваних величин та позаштатних ситуацій; 2 – електронний комутатор вхідних сигналів від одного або декількох ПВП витрати (Δ*p*/i), одного манометричного (*p*/*i*) й одного термометричного (*T*/*i*) приладів; 3 – перетворювач вхідних сигналів у цифровий код; 4 – клавіатура для виведення контрольованих параметрів і введення призначуваних параметрів, коефіцієнтів та процедур (інструкцій); 5 і 6 – зовнішні регулювальні пристрої із виконавчими механізмами, керовані сигналами лічильника; 7 – контролер і центральний процесор; 8 – програма для обчислювальної обробки даних; 9 – постійний запам'ятовувальний пристрій з набором сталих величин і коефіцієнтів; 10 – підпрограми обчислення різних величин (густини, швидкості потоку, маси й об'єму речовини, що перетекла трубопроводом за певний відтинок часу, та ін.) і коефіцієнтів (наприклад, розширення); 11 – оперативний запам'ятовувальний пристрій з набором інструкцій; 12 – інтерфейс для роботи із зовнішніми пристроями (принтером, ПЕОМ, модемом для зв'язку телефонною лінією тощо)

Коректори забезпечують:

виведення результатів вимірювань і обчислень на табло;

архівування значень параметрів: погодинні архіви за 840 год, добові архіви за 300 діб, місячні архіви за 24 місяці;

збереження архівів і введеної бази даних протягом 10 років, прив'язку архівів до розрахункової години та розрахункового дня;

захист даних і результатів обчислень від несанкціонованої зміни;

компенсацію зсуву нуля і діапазону датчиків тиску та перепаду тиску;

автоматичне визначення та контроль параметрів потоку газу;

контроль рівнів вхідних електричних сигналів;

архівування діагностичних повідомлень із прив'язкою за часом.

Поточні й архівні значення всіх вимірюваних параметрів і результатів обчислень виводять на табло коректора, принтер (для цілей документування результатів вимірювань) і комп'ютер – безпосередньо або через телефонний модем.

Отриману за допомогою ВІС інформацію поділяють на оперативну, статистичну та звітну. *Оперативною* називають інформацію, використовувану для контролю та керування технологічним процесом. Важлива її частина – інформація про техніко-економічні показники виробничої діяльності. *Статистичною* називають інформацію, одержувану на основі багаторазових вимірювань, вона дозволяє робити висновки про якість технологічного процесу протягом тривалого часу (кілька годин, днів, місяців). *Звітною* називають інформацію, що містить відомості про кількість, якість і асортимент сировини, проміжних і кінцевих продуктів технологічного процесу.

Ще один важливий напрям використання ВІС, який останнім часом набув особливо інтенсивного розвитку, – технічне діагностування, що надає інформацію про несправності та пошкодження устаткування, на підставі якої виявляють місця ушкоджень і встановлюють причини несправностей. Завдання технічного діагностування розв'язується з використанням контрольних карт процесу, оцінок змінних станів і параметрів математичних моделей процесу, методів розпізнавання технічних образів, інформаційних графів.

Контрольні запитання

1. Що таке сучасні мікропроцесорні вимірювальні прилади?
2. Що дає застосування у вимірювальних приладах мікропроцесорів?
3. Що називають цифровим вимірювальним приладом?
4. Що називають квантуванням за рівнем?
5.?
6. За якими ознаками можна класифікувати цифрові вимірювальні прилади?
7. Яка суть методу компенсації похибки за знаком в приладах подвійного інтегрування?

8. Яка одна з найважливіших складових похибки, що визначає довгочасну стабільність метрологічних характеристик цифрового вольтметра?

9. Що являє собою цифрова фільтрація?

10. Які переваги мають мікропроцесорні термоперетворювачі над традиційними термоперетворювачами з уніфікованим вихідним сигналом?

11. Які функції виконують для автоматизації технологічних процесів ВІС?

РОЗДІЛ 10
СУЧАСНІ ПЕРВИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

10.1. Загальні відомості

У наш час паралельно з розвитком інформаційних технологій швидкими темпами створюються і впроваджуються у сільське господарство системи комплексної автоматизації виробничих процесів з використанням нових елементів автоматики. У розділі наведено довідковий матеріал про сучасні первинні перетворювачі вітчизняних та зарубіжних виробників.

Для отримання інформації про значення параметрів, які характеризують хід виконання технологічних процесів, використовується дуже великий комплекс різноманітних електричних і неелектричних первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків), Первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) є головними чутливими органами вимірювальної апаратури і всіх пристроїв систем контролю й управління. Вони забезпечують вимірювання теплоенергетичних, електроенергетичних, механічних величин, а також величин, що характеризують хімічний склад і фізичні властивості.

За видом енергії, яка використовується (контролюється) ПВП поділяють на електричні, пневматичні, гідравлічні.

За видом сприймаючої інформації ПВП можна розділити на датчики **температури, вологості, рівня, витрати, тиску, переміщення** і так далі.

За принципом роботи електричні ПВП можна розділити на **потенціометричні, тензометричні, індуктивні, індукційні, терморезисторні, термоелектричні, сорбційні, ємнісні, фоторезисторні, фотоелектричні, п'єзоелектричні, пірометричні** і так далі.

За видом вихідної величини ПВП поділяються на **генераторні та параметричні.** Якщо вихідною величиною ПВП є напруга, яка генерується цим перетворювачем (без використання додаткових джерел живлення), то він називається генераторним. Якщо вихідною величиною ПВП є параметр електричного кола (опір R, індуктивність L чи ємність C), то він називається параметричним. На відміну від генераторних параметричні ПВП потребують додаткових джерел живлення.

У залежності від характеру вихідного сигналу первинні перетворювачі бувають із звичайним вихідним сигналом або з уніфікованим. Звичайний вихідний сигнал формується природним шляхом і являє собою напругу, опір, електричну ємність, частоту, зусилля і так далі.

Уніфікований сигнал - це сигнал визначеної фізичної природи, що змінюється у визначених фіксованих межах незалежно від виду і діапазону контрольованої величини. З уніфікованих сигналів найбільш широкого поширення набули електричні сигнали: постійний і змінний струми, напруга і частота, а також пневматичні сигнали. Уніфіковані сигнали отримують із звичайних за допомогою спеціальних перетворювачів.

ПВП з релейним вихідним сигналом (дискретні ПВП) формують вихідний сигнал у вигляді позиційної зміни положення контактів (логічних змінних «0», «1»), яке відбувається при певних значеннях вхідного сигналу.

Нижче наводяться типи і характеристики сучасних первинних перетворювачів таких відомих виробників засобів автоматики як компанії і фірми АО "Тера", Овен, ПП «НВФ «РегМік», Snieder Electric, Honeywell, Heraeus Sensor Technology Gmbh, Epcos Inc., Dallas Semiconductor, Omron, Michell Instruments Ltd, General Eastern Instruments, Sencera, E+E Electronik, Maxim, Microchip Technology Inc., Panametrics, Shaw, General Eastern Instruments, DuPont, Sensirion, Syhitech, Apar, Parallax Inc. та ін.

10.2. Перетворювачі температури

Температуру вимірюють за допомогою пристроїв, у яких використовуються різні термометричні властивості рідин, газів або твердих тіл. Найбільш поширені фізичні властивості, пристрої для вимірювання температури та орієнтовні межі їх використання наведені у табл. 10.1.

Таблиця 10.1

Пристрої для вимірювань температури

Термометрична властивість	Назва пристрою	Межі вимірювання, °С	
		нижня	верхня
Теплове розширення	Рідинні скляні термометри	-190	600
Зміна тиску	Манометричні термометри	-160	600
Зміна електричного опору	Електричні термометри опору Напівпровідникові термометри (термістори, терморезистори)	-200 -90	500 180
Термоелектричні ефекти (термо-е.р.с.)	Термоелектричні термометри (термопари) Термопари спеціальні	-50 1300	1600 2500
Теплове випромінювання	Оптичні пірометри Радіаційні пірометри Фотоелектричні пірометри Колірні пірометри	700 20 600 1400	6000 3000 4000 2800

Термометром називають пристрій або прилад, що служить для вимірювання температури шляхом перетворення її у покази або сигнал, який

є відомою функцією температури. Первинним перетворювачем або чутливим елементом термометра називають частину, яка перетворює теплову енергію в інший вид енергії для отримання інформації про температуру.

Розрізняють термометри контактні і безконтактні. Чутливий елемент контактного термометра входить у безпосередній контакт з середовищем вимірювання.

Пірометром називають безконтактний термометр, дія якого основана на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл.

Рідинні скляні термометри

Першими були створені і широко використовуються і в теперішній час рідинні термометри. Дія скляних рідинних термометрів основана на різниці коефіцієнтів теплового розширення термометричної речовини та оболонки, у якій вона знаходиться (термометричне скло або кварц). У якості термометричної речовини у скляних термометрах, крім ртуті, застосовуються метиловий чи етиловий спирти, толуол і інші рідини. Температурна точка для повірки термометрів, якщо вона попадає у діапазон вимірювання, – потрійна точка води (0,01^{o}C). Основна перевага скляних рідинних термометрів – простота використання і достатньо висока точність вимірювання.

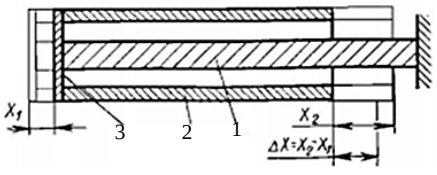
Біметалеві та дилатометричні перетворювачі

Дія дилатометричних та біметалевих перетворювачів основана на властивості теплового розширення різних твердих тіл. Найпростіший дилатометричний перетворювач складається з двох стрижнів: внутрішнього 1 і зовнішнього 2. Обидва стрижні жорстко закріплені на загальній основі 3, рис.10.1, а. Коефіцієнт лінійного розширення одного з них (зазвичай зовнішнього) у 10 - 20 разів більший (активний елемент), ніж іншого. Його виготовляють з міді, алюмінію, латуні, сталі, нікелю і ін. Для другого стрижня (пасивного елементу) зазвичай використовують інвар (64% Fe + 36% Ni) чи кераміку. При зміні температури на ΔT кінці стрижнів переміщуються на відстань Δx, яка пропорційна зміні температури:

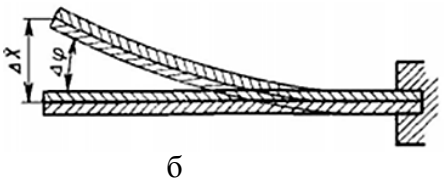
$$\Delta x = K \cdot \Delta T,$$

де К - коефіцієнт чутливості, який визначається різницею коефіцієнтів лінійного розширення стрижнів.

Різниця коефіцієнтів лінійного розширення стрижнів залежить від обраних матеріалів. Так, для латуні $\alpha_T=(18\div20)\cdot10^{-6}$ на 1°С, а для інвару - $1{,}8\cdot10^{-6}$ на 1°С.



а



б

Рис.10.1. Дилатометричний - а, та біметалевий - б перетворювачі

У біметалевих термометрах у якості чутливого елемента використовуються пластинки або стрічки, які складаються з двох різнорідних металів, які характеризуються різними коефіцієнтами теплового розширення. Найчастіше використовують мідноцинковий сплав – латунь (70%Cu + 30%Zn) та сплав заліза з нікелем – інвар.

На відміну від дилатометричних, у біметалічних термоелементів пластини з різними коефіцієнтами лінійного розширення зварені між собою (рис.10.1, б). Тому при зміні температури на ΔT пластина згинається. Відповідне переміщення кінця пластини Δx (при малих кутах) становить:

$$\Delta x=0.75Kl\Delta T/h,$$

де К – коефіцієнт, обумовлений вибором пари металів, l – довжина пластин, мм; h – товщина пластин, мм.

Біметалеві і дилатометричні перетворювачі використовують переважно в якості термореле та дискретних регуляторів температури.

У приладах і системах вимірювання і контролю температури в основному застосовують такі типи перетворювачів: термометри опору, термоелектричні (термопари), напівпровідникові перетворювачі (терморезистори, термістори) пірометри, тепловізори та ін.

Термоперетворювачі опору

Принцип дії термоперетворювачів опору (ТО) заснований на властивості провідників (або напівпровідників) змінювати свій електричний опір при зміні температури. З провідникових матеріалів широке розповсюдження отримали платина і мідь. Для вимірювання високих температур (понад 600 °С) використовується вольфрам.

Температурна залежність опору платини в інтервалі температур 0…650^{o}С описується рівнянням:

$$R_T = R_0\left(1 + AT + BT^2\right),$$

де R_0– опір провідника при 0^{o}С, R_T– опір провідника при температурі Т, ^{o}С, постійна А = 3,9702х10-3 1/^{o}К; В=5,8893х10-7 1/^{o}К^2. Температурний коефіцієнт опору (ТКО) платини при температурах 0…100 ^{o}С складає приблизно 1/273 град$^{-1}$.

В інтервалі температур 0…-200 ^{o}С залежність опору платини від температури має вигляд:

$$R_T=R_0[1+AT+BT^2+C(T-100)^3],$$

де С=4,35х10^{-12}1/К^3- сталий коефіцієнт.

Платина навіть при високих температурах в окислювальному середовищі не змінює своїх фізико-хімічних властивостей. Діапазон перетворюваних температур -260…+1300 ^{o}С.

В перетворювачах температури завдяки невисокій вартості і досить високій стійкості до корозії широко використовується мідь. Залежність електричного опору міді від температури має вигляд:

$$R_T = R_0\left(1+\alpha_0 T\right),$$

де α_0 - ТКО міді, α_0=1/234,7 1/^{o}К. Діапазон перетворюваних температур складає -50…+180 ^{o}С.

ТО відрізняються високою точністю (до 0,1 °С), стабільністю показів, близькістю характеристики до лінійної залежності та взаємозамінністю.

В залежності від матеріалу чутливого елемента термоперетворювачі опору позначають ТСМ - мідні і ТСП - платинові.

Термометри опору ТСМ0618 призначені для вимірювання температури газоподібних, рідких середовищ і твердих тіл у різних галузях в умовах експлуатації: при температурах від мінус 50 до 50°С і відносній вологості повітря до 98% при температурі 35°С. Характеристики ТСМ0618 наведені у табл. 10.2.

Таблиця 10.2

Характеристики мідних термометрів опору ТСМ0618

Назва характеристики	ТСМ 0618	Модифікації					
		01	02	03	04	05	06
Номінальна статична характеристика, (НСХ)	1х50М; 1х100М; 2х50М; 2х100М	1х50М;1х100М				1х50М; 1х100М; 2х50М; 2х100М	1х50М; 1х100М
Клас допуску	А, В, С	В, С					
Діапазон вимірюваних температур, °С	кл. А: -50... 120 кл. В: -50. ..180	-50... 180		-50... 120	-50...60	-50...180	-50...120
Відхилення опору при 0°С від номінального значення, Ом	Клас А ± 0,05; Клас В ± 0,1 Клас С ±0,2 6						
Границя допустимої абсолютної похибки, °С	Клас А ±(0,15+0,002t) Клас В ± (0,25+0,0035 t) Клас С ±(0,50+0,0065t)						
Показник теплової інерції, не більше, с	20; 40	20; 30	20	20	70	8	8
Схема внутрішніх з'єднань	2-х, 3-х, 4-х провідникова		3-х, 4-х провідникова		2-х	2-х, 3-х, 4-х	3-х, 4-х
Степінь захисту від води і пилу	IP54	IP40	IP00		IP54	IP00	
Довжина занурюваної частини, мм	80...3150	80...500		45	80	22... 80	500... 3000
Діаметр занурюваної частини, мм	8; 10	8	6	6	8; 9	5; 5,7	8;9
Маса, кг	0,25... 1,33	0,14... 0,35	0,10... 0,25	0,125	0,080... 0,085	0,003... 0,006	0,025... 0,100
Захисна арматура	Антикорозійна сталь або латунь						
Середній строк служби, років	12						

Сучасні перетворювачі температури виробництва АО "ТЕРА" показані на рис.10.2. Виготовляються **занурювальні, повітряні, поверхневі, тонкоплівкові, багатозонні та спеціальні перетворювачі.** Перетворювачі

призначені для вимірювання температури від -196 до 800 °С рідких і газоподібних середовищ і твердих тіл у різних галузях.

Характеристики термометрів опору АО "ТЭРА" наведені в табл.10.3. Чутливі елементи для 50М, 100М, 50П, 100П виготовляються вручну шляхом намотування тонкого мідного або платинового дроту, елементи Pt100 і Pt1000 виконуються методом напилення тонкого шару платини на керамічну підкладку. При цьому платина повністю зберігає свої властивості, такі як стійкість до високих температур, термостабільність, практично лінійна температурна залежність опору від температури. Сьогодні ТСП Pt100 і Pt1000 - найбільш поширені датчики температури.

Таблиця 10.3

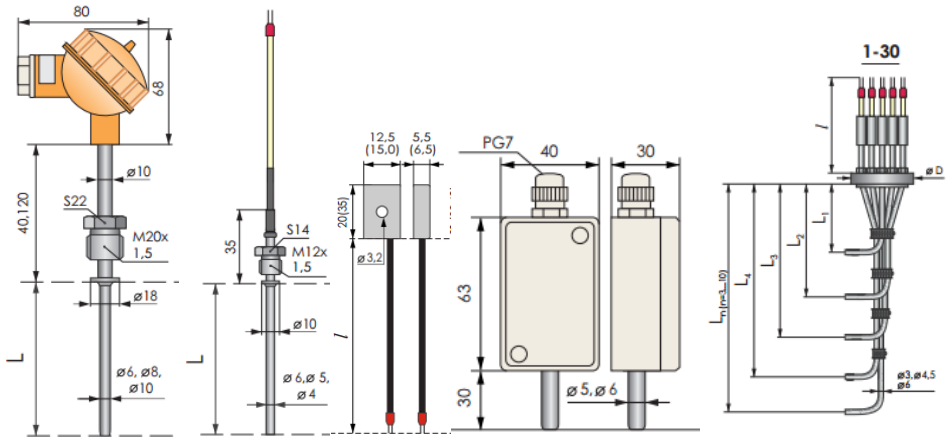
Термометри опору АО "ТЭРА"

Тип датчика	НСХ*	Граничне відхилення	Клас допуску	W100= $=R_0/R_{100}$	Діапазон вимірювання, °С	$I_{макс}$, мА
ТСМ	50М, 100М	± (0,25+0,0035t)	В	1,4280	-50...180	1
ТСП	50П, 100П	± (0,30+0,0050t)	В	1,3910	-100...600	3
	Pt100, Pt500	± (0,10 + 0,0017t)	1/3В	1,3850	-196....750	1; 0,7
	Pt1000, Pt2000	± (0,15 + 0,0020t)	А		-50...500	0,3

*НСХ - номінальна статична характеристика

Виготовляються **занурювальні** термометри опору (50М, 100М, Pt100, Pt1000, Pt500), в яких чутливими елементами можуть бути також термопари і термістори. Перетворювач складається з робочої частини, яка занурюється у вимірюване середовище і виконана із захисної арматури, і зовнішньої частини - клемної головки або вихідного кабелю, рис.10.2. а,б. Головка перетворювачів має водозахищене виконання. Матеріал захисної арматури - сталь 12Х18Н10Т або латунь-нікельовані гільзи (моделі серий 1-15). Матеріал голівки - склопластик АБО алюміній. Штуцер – рухомий (моделі 1-3,1-5,1-11), або нерухомий (1-3н,1-5н). Термоперетворювачі можуть мати розбірну конструкцію, яка складається з захисної арматури з голівкою і змінної термометричної вставки, або зварну нерозбірну конструкцію. Модель 1-13 являє собою кабель з мінеральною ізоляцією і оболонкою з н/ж сталі (так званий КТМС) діаметром 1,5 мм з неізольованим спаєм і монтажними виходами. Застосування такої конструкції дозволяє отримати мінімальну інерцію і зробити датчик гнучким і практично необмеженим в довжині (до 3 м). Модель 1-14 виконана у вигляді гвинта М6 або М8 для зручності кріплення.

Термоперетворювачі, рис.10.2, а, мають вмонтовану в корпус плату перетворення "опір - струм" з уніфікованим виходом. Схема підключення - двопровідна, що не вимагає окремого живлення.



а б в г д

Рис.10.2. Перетворювачі температури АО "ТЕРА":

а,б – занурювальні; в – поверхневі; г – повітряні, д – багатозонні

Повітряні термоперетворювачі призначені для вимірювання температури як зовнішнього повітря, так і повітря всередині приміщень, вентиляційних шахт і т. п. Залежно від моделі виготовлятися з двома типами корпусів: пластикового і алюмінієвого. ПП моделі 2-10, рис.10.2, г, являє собою головку з АБС пластика, герметичного вводу для під'єднання кабелю і нержавіючої трубки, на кінці якої знаходиться відкритий платиновий, мідний або термісторний чутливий елемент. Робочий діапазон температур -40…60°С для пластикового і -50…100°С для алюмінієвого корпусу. Показник інерції 8…10с.

Крім розглянутих, цим підприємством виготовляються **поверхневі** перетворювачі температури, типів ТСМ, ТСП, а також ТХА, ТХК, ТМК, ТСТ для вимірювання температури поверхні твердих тіл у діапазоні робочих температур -50…1000°С. Термоперетворювачі цієї групи відрізняються високою надійністю, малими розмірами, матеріалоємністю, поліпшеними показниками теплової інерції. Вони стійкі до вібрації і зберігають працездатність при вологості до 98%. Термоперетворювачі рекомендуються для вимірювання температури поверхонь обмоток електродвигунів і генераторів, а також температури поверхонь труб будь-якого діаметра.

Платиновий або мідний чутливий елемент перетворювачів знаходиться в жорсткому алюмінієвому корпусі, покритому високотемпературною емаллю. Спосіб установки перетворювача на поверхню - на клей БФ-2, ЭПК-1 і ін. У моделі 2-8 платиновий або мідний чутливий елемент в алюмінієвому корпусі встановлюється на будь-яку поверхню за допомогою гвинта М3, рис.10.2, ,в. Характеристики перетворювача: Робочий діапазон вимірювань -50…150 ^{0}С, показник теплової інерції не більш 0,5 с, маса не більше 6,5 г.

Багатозонний термоперетворювач (термопідвіска), рис. 10.2.д, застосовується для вимірювання градієнтів температур в ємностях, канальних печах, сушках і т.п. Виконаний з спеціалізованого термопарного кабелю з оболонкою з нержавіючих сталей або нікелевих сплавів. В якості чутливих елементів використовуються платиновий термометр опору (ТСП), а

також термопари (ТХА) і термістори (ТНН). Термопідвіска з чутливим елементом ТСП (321S, 316S) забезпечує вимірювання температур в діапазоні -50...250°С, -50...500°С, показник інерції 3…8с.

Компанія Овен (Україна) випускає терморезистори ДТС (на заміну відомим ТСП, ТСМ). Моделі ХХ4 виготовляються з кабельними виводами, ХХ5- з комутаційною головкою. Характеристики перетворювачів наведені у табл.10.4.

Таблиця 10.4

Характеристики перетворювачів ДТС компанії Овен

Характеристика датчика	ДТСХХ4		ДТСХХ5	
Номінальна статична характеристика	50М; 100М	50П; 100П; Pt100; Pt500; Pt1000	50М; 100М	50П; 100П; Pt100; Pt500; Pt1000
Діапазон вимірюваних температур, °С	-50...+150	-50...+250	-50...+180	-50...+500
Клас допуску	В; С	А; В; С	В; С	А; В; С
Умовний тиск, МПа	10		10	
Робочий струму, не більше мА	5		5	
Інерційність, не більше с	10...30		10...30	
Чутливі елементи, шт.	1; 2		1; 2	
Схема з’єднання	2-х, 3-х, 4-х провідникова			
Ступінь захисту	IP54		IP54	
Матеріал арматури	сталь 12Х18Н10Т (мод. 024, 044–184); латунь (мод. 014, 034, 204, 224)		сталь 12Х18Н10Т	

Фірма Heraeus Sensor Technology Gmbh (Німеччина) виготовляє **тонкоплівкові** резистори, виконані номіналом 100, 200, 500, 1000 і 2000 Ом, які застосовуються для вимірювання температури, вологості, витрати повітря, рис.10.3.

Використовується технологія напилення платини на багатошарову основу, що дозволяє виробляти платинові резистори вкрай малих габаритів з мінімальною витратою платини. При цьому зберігаються властивості платини, такі як стійкість до високих і низьких температур, термостабільність, малий коефіцієнт розширення, хімічна інертність і практично лінійна температурна залежність опору в широкому діапазоні.

Виготовляються тонкоплівкові платинові резистори наступних серій: С, L, М, М, Н - ЧЕ без корпусу з приєднувальними проводами; MR - тонкоплівковий ЧЕ, укладений в керамічний капсулу; SMD, SMD FC - ЧЕ з поверхнями для пайки; ТО 92 і SOT 223 - ЧЕ, залитий в пластмасовий корпус з нерухомою приєднувальних ніжкою для монтажу на друкованих платах.

Кожен тип сенсорів має свій температурний діапазон. С - діапазон кріогенних температур: -196 ... + 500 °С. Номінальний опір датчиків цього типу 100 або 1000 Ом. ТКО = 1,3850 град$^{-1}$. L - діапазон низьких температур: -50 ... + 400 °С. Номінальний опір датчиків цього типу 100, 500 або 1000 Ом. ТКО = 1,3850 град$^{-1}$. М (МН) - діапазон середніх температур: -70 ... + 600 °С.

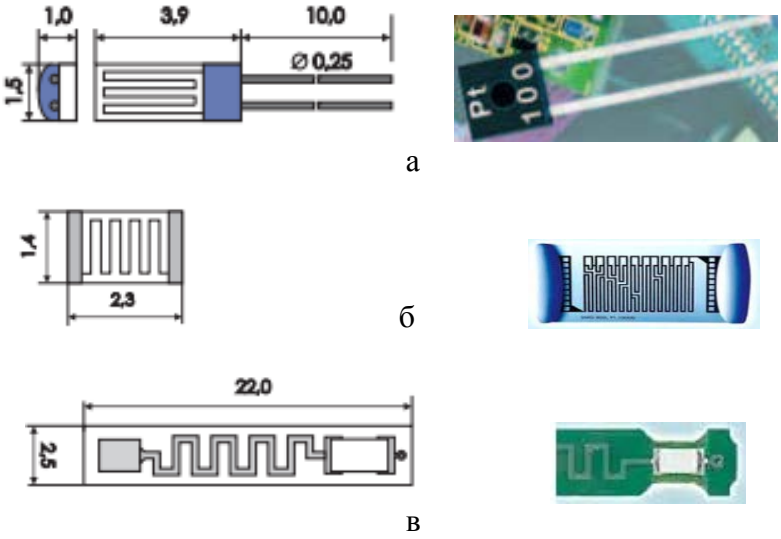


Рис.10.3. Тонкоплівкові резистори:
а - М416; б - SMD 0805; в - PCB 2225 (розміри наведені у мм)

Номінальний опір датчиків цього типу 100, 500, 1000 і 10000 Ом. ТКО = 1,3850 і 1,3750 град$^{-1}$. Діапазон Н (НА, HD, HL) - діапазон високих температур: -70 ... + 1000 °С. Номінальний опір датчиків цього типу 100, 200 або 1000 Ом. ТКО = 1,3850 і 1,3770 град$^{-1}$. Основні характеристики наведені у табл. 10.5.

Таблиця 10.5

Характеристики тонкоплівкових резисторів Heraeus Sensor Technology Gmbh

Назва моделі	Діапазон температур, °С	Показник інерції, с	Струм вимірювання, мА
М 222	-70...500	10	0,1…1
М 416	-70...500	10,5	0,3…1
SMD 0603	-50...130	8	0,3
SMD 0805	-50...130	8	0,1…1
PCB 2225	-40...150	5	0,1…1

Термопари

Термопари є найбільш високотемпературними контактними датчиками. Вони діють за принципом термоелектричного ефекту Зеєбека. Конструкція перетворювача містить два електроди, виготовлені з різнорідних матеріалів або сплавів, кінці яких з'єднані між собою за допомогою спаїв. При нагріванні одного зі спаїв у колі електродів генерується термо- е.р.с., пропорційна різниці температур спаїв. При температурах спаїв T_1 і T_2 між ними виникає термоелектрорушійна сила Е:

$$E = \psi\,(T_1 - T_2),$$

де ψ – стала для даної пари провідників – коефіцієнт термо-е.р.с.

Значення термо-е.р.с. найбільш поширених матеріалів у парі з платиною при температурі робочого спаю 100 °С та температурі вільних кінців 0 °С. наведені у табл.10.6. Термо-е.р.с. будь-якої пари термоелектронів може бути визначена як алгебраїчна різниця значень їх термо-е.р.с. у парі з платиною.

Таблиця 10.6

Термо-е.р.с. деяких матеріалів у парі з платиною

Матеріал	Термо -е.р.с., мВ	Матеріал	Термо е.р.с., мВ
Кремній	+44,8	Паладій	-0,57
Хромель	+2,4	Нікель	-1,2…-1,9
Залізо	+1,8	Алюмель	-1,7
Вольфрам	+0,8	Константан	-3,4
Мідь	+0,76	Копель	-4,5
Золото	+0,75	Молібденіт	-69…-104

Головною перевагою термопар є великий температурний діапазон вимірювання від -200°С до +2500°С, який безпосередньо залежить від використаних матеріалів. Наприклад, термопари із неблагородних металів забезпечують вимірювання температур до 1100 °С. Термопари із благородних металів (платинова група) - від 1100 до 1600 градусів. Якщо необхідно провести заміри ще більш високих температур, використовуються жаростійкі сплави, основою яких є вольфрам. До переваг термопар відносяться також простота, технологічність, висока відтворюваність результатів, лінійна температурна залежність, надійність і дешевизна. Основні недоліки - досить велика похибка, необхідність компенсації температури холодного спаю.

Для підключення термопари, яка часто розташовується на віддаленій від приладу ділянці вимірювання температури, необхідно використовувати подовжуючі провідники. Для того, щоб не виникало похибки через різницю температур t_1 вільного кінця термопари та температури точки під'єднання приладу t_o, використовується компенсаційний провід.

Компенсаційні проводи розвивають у з'єднаннях за невеликих температур (до 100 – 150°С) термо-е.р.с., рівну термо-е.р.с. термопари і є, по суті, продовженням її вільних кінців. Тільки термоелектроди із дорогих металів замінюють дешевшими компенсаційними проводами. Компенсаційні проводи випускаються з жилами перерізом 0,2 – 2,5 мм^2, в різній ізоляції та з різним покриттям. Кожному матеріалу жил присвоєно певний колір обмотки або зовнішнього шару ізоляції. У деяких випадках під ізоляцією у проводі прокладається кольорова пізнавальна нитка.

Термопари типу ТПР, ТВР не потребують компенсації термо-е.р.с. вільних кінців, оскільки нижня межа вимірювання лежить значно вище

температури у зоні під'єднання приладу. У виробничих умовах для автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців використовують спеціальні електричні схеми.

АО «ТЕРА» виготовляються поверхневі термопари типів ТМК, ТХА, ТХК, занурювальні термопари хромель-алюмель, хромель-копель, залізо-константан (ТЖК), та ін. Характеристики термопар АО «ТЕРА» наведені в табл. 10.7.

Таблиця 10.7

Термопари АО «ТЕРА»

Тип	Назва	НСХ	Діапазон, °С
ТМКн	Термопара мідь-константан	тип Т	-100...260
ТХК	Термопара хромель-копель	тип L	-50...600
ТЖК	Термопара залізо-константан	тип J	-50...600
ТХА	Термопара хромель-алюмель	тип Е	-50...1100
ТНН	Термопара нікросил-нісил	тип N	0...1200
ТПП	Термопара платинародій-платина	тип S	0...1300
		тип R	
ТПР	Термопара платинародій-родій	тип В	600...1600

Розробником і виробником датчиків температури (термоперетворювачів опору/термометрів опору ТСМ, ТСП, перетворювачів термоелектричних/термопар ТХА, ТЖК, ТХК, напівпровідникових перетворювачів - ТП) в Україні є ПП «НВФ «РегМік».



Рис. 10.4. Датчики температури «НВФ «РегМік»

За призначенням виготовляються термоперетворювачі (датчики температури) **занурювальні** та **з кабельними виводами,** призначені для вимірювання температури навколишнього середовища, рідких, газоподібних і сипучих хімічно неагресивних середовищ; **поверхневі** з малими розмірами і невисоким показником теплової інерції для вимірювання температури поверхні твердих тіл в різних галузях; **повітряні** з мінімальним показником теплової інерції призначені для вимірювання температури повітря в різних галузях, рис.10.4.

Термістори

Термістори (напівпровідникові резистори) використовують принцип зміни опору напівпровідника від температури. Вплив температури на електрофізичні параметри напівпровідників в основному, виявляються в зміні концентрації носіїв заряду, що приводить до відповідної зміни

електричної провідності. Температурна залежність опору від температури описується формулою:

$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}},$$

де A і B – постійні коефіцієнти. У термісторів зворотна залежність R_T від T: зі збільшенням температури їх опір зменшується за експоненціальним законом.

Напівпровідникові терморезистори відрізняються від металевих великими значеннями ТКО, меншими габаритами і інерційністю, а також досить великою чутливістю (на порядок і більше ніж у металевих).

Чутливі елементи для термісторів виготовляються на основі різних оксидів металів MnO, NiO, CoO, CuO. Найбільш поширеними є терморезистори КМТ-1, рис. 10.5, а, КМТ-4, ММТ-1, ММТ-4 та ін. В цих позначеннях перші букви означають тип напівпровідника, з якого виготовлено чутливий елемент (наприклад, КМ – кобальто-марганцевий, ММ – мідно-марганцевий, ТРА-1 - на основі монокристалу синтетичного алмазу). Цифрами умовно позначають тип конструктивного оформлення: КМТ- 1, КМТ-4, ММТ-1, ММТ-4 – стержневі; СТ4, ТРА-1– бусинкові, ПТ, ПТ-1, ТР – дискові. Характеристики окремих термісторів наведені у табл.10.8.

Таблиця 10.8

Основні характеристики термісторів

Тип	Межі номінальних опорів	Допустиме відхилення, %	Постійна "В", К	ТКО при температурі 20 °С, % на 1°С	Діапазон робочих температур, °С	Постійна часу, с	Максимальна потужність, при 20°С
КМТ-1	от 22кОм до 1 Мом	±20	от 3600 до 7200	От 4,2 до 6,4	–60…180	85	1000
ММТ-1	от 22кОм до 1 Мом	±20	от 2960 до 4300	от 2,4 до 5,0	–60…125	85	600
КМТ-4	от 22кОм до 1 Мом	±20	от 3600 до 7200	От 4,2 до 6,4	–60…125	115	650
ММТ-4	от 22кОм до 1 Мом	±20	от 2960 до 4300	от 2,4 до 5,0	–60…125	115	560
КМТ-8	от 100 Ом до 10 кОм	±10; ±20	от 3600 до 7200	От 4,2 до 6,4	–60…70	900	600
ММТ-8	от 1 Ом до 1 кОм	±10; ±20	от 2060 до 2920	от 2,4 до 3,4	–60…70	900	600
СТ4-16	10 кОм…27 кОм	-±5; ±10;	2720…3960	3,45…4,45	–60…155	30	150
ПТ, ПТ-2	80 Ом…400 Ом	±20	3800…4100	4,4…4,8	–60…150	-	
ТР-4	1 кОм	±20	1600…1960	1,8…2,2	–60…200	3	70
ТРА-1	0,01… 10000	±5; ±10; ±20	300… 2500	0,2… 2,3	-200… +350	1	500
СТ6-4Б (позитрон)	100…400 Ом			15	–60…125	40	0,8

Поряд з перевагами (висока чутливість, малі інерційність і розміри, невисока ціна) у термісторів є і недоліки, основна з яких - нелінійність

характеристик. ТКО в робочому діапазоні температур може змінювати свою величину іноді навіть на кілька порядків, а в межах навіть однієї конфігурації може відрізнятися майже в два рази. Технологія виготовлення не дозволяє отримувати номінальні значення опорів навіть для одного типу термісторів з розкидом менше (10 ... 20)%, що обмежує взаємозамінність. Але основним недоліком термометрів цього типу є те, що вони, незважаючи на проведення в процесі виготовлення штучного старіння, володіють низькою часовою стабільністю і відтворюваністю.

АО "ТЕРА" виготовляє термістори ТСТ для вимірювання температур в діапазоні -40...120°С з номінальною статичною характеристикою типу 10k NTC FT003. Основні характеристики наведені у табл. 10.9.

Таблиця 10.9

Характеристики термісторів «ТЕРА»

Тип	НСХ	R_{25}, Ом	Граничне відхилення R_{25},%	B_{25}/ B_{85}	Граничне відхилення B_{25}/ B_{85}, %
ТСТ 1-4-10К-NTC	10k NTC FT003	1000	±1	3970К	±1

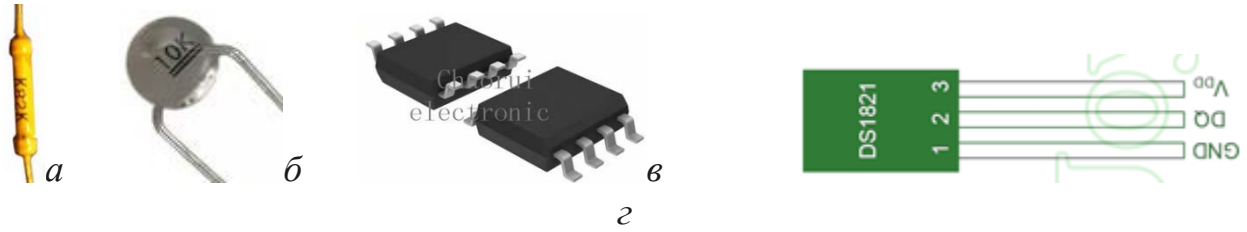
На рис. 10.5, б, наведено термістор NTC 10K OHM компанії EPCOS Inc. з характеристиками: діапазон робочих температур -55°С ~ 125°С, опір при 25°С - 10 кОм, допуск 5%, B25/100 - 4300K, допуск 3%, потужність 450 мВт, корпус - литий диск.

На агропромисловому ринку останнім часом активно просуваються цифрові напівпровідникові датчики температури, які являють собою інтегральну мікросхему, що містить в собі чутливий елемент і перетворювач в цифровий сигнал. Одним з провідних виробників напівпровідникових цифрових чутливих елементів є фірма Dallas Semiconductor. Елементи цієї фірми використовуються в напівпровідникових цифрових датчиках виробництва АО "ТЕРА". Основні переваги цих датчиків: зручна схема підключення, цифровий сигнал і невисока ціна. Недоліками є вкрай слабка завадостійкість.

Фірма Microchip Technology Inc. випускає програмовані датчики температури серій TC та TCN та ін. Мікросхема TC620 є програмованим датчиком температури і призначена для управління температурою з можливістю програмування контрольованої температури. В одному корпусі інтегральної мікросхеми КМОП об'єднані: датчик температури (терморезистор); генератор опорної напруги; два компаратори; тригер. Вона має два логічних виходи "HIGH" та "LOW", які програмуються зовнішніми резисторами, та додатковий вихід "CONTROL", який встановлюється, коли температура перевищує запрограмований рівень "HIGH", і скидається, коли температура спадає нижче запрограмованого рівня "LOW".

Мікросхема TC621 забезпечує ті ж вихідні функції за винятком того, що логічні рівні на виходах "LOW" і "HIGH" інверторовані. На відміну від TC620, до TC621 підключається зовнішній терморезистор. Цю мікросхему зручно використовувати для дистанційного контролю температури.

Мікросхеми TC620 / TC621 випускаються в корпусах 8-pIN SOIC і 8-pIN PDIP і можуть застосовуватися в залежності від виконання в температурному діапазоні від - 40 до + 125 ° С. Напруга живлення мікросхеми може бути від 4,5 до 18 В.



а *б* *в* *г*

Рис. 10.5. Датчики температури КМТ-1, NTC 10K OHM, TC74, DS1821

Датчик TC74, рис. 10.5, в, являє собою датчик температури з послідовним портом, який формує сигнал на виході INT/CMPTR. Вихід INT/CMPTR може бути запрограмований як вихід компаратора для роботи термостата, або як вихід запиту переривання від температури. Вбудований АЦП забезпечує перетворення температури у восьмирозрядний двійковий код. Роздільна здатність АЦП -1 ^{o}C, номінальна швидкість перетворення 8 виборок/с.

Програмований температурний датчик TCN75 формує сигнал на виході INT/CMPTR, коли зовнішня температура перевищує запрограмоване граничне значення. Максимальна гранична температура складає 80 ^{o}C, гістерезис 5 ^{o}C, який також можна програмувати. Зв'язок з TCN75 здійснюється через двопровідникову шину, сумісну із стандартним протоколом I2C. Перетворювачі выпускаются в корпусах 8-Pin SOIC, 8-Pin PDIP, 8-MSOP и можуть застосовуватися в температурному діапазоні від - 55 до + 125 °С.

Компанією Хоневелл виготовляються мініатюрні датчики температури з швидкісним відгуком та лінійними статичними характеристиками для вимірювання температури повітря (TDA5) та рідини (TDA4). Температурний діапазон вимірювань від -40 до +150 ^{o}C, номінальний опір складає 2 кОм при температурі 20 ^{o}C. Максимальна напруга живлення постійним струмом 10 В. Для з'єднання використовуються два термінали (TDA4) або три голчастих виводи (TDA5). Точність перетворення складає ±0,7 ^{o}C при температурі 20 ^{o}C та ±2,5 ^{o}C в діапазоні вимірювання. Розміри (мм) 3/8-24 UNF діаметр 38,1 (TDA4) та 4,06×3,0 (TDA5). Прилади дозволяють проводити взаємозаміну без перекалібровки.

Однією з нових розробок компанії Dallas Semiconductor, яку в Україні представляє підприємство Imrad, м. Київ, є **програмований цифровий термостат** DS1821. Термостат призначений для вимірювання температури, а також для двопозиційного регулювання температури і сигналізації. Зовнішній вигляд DS1821 і його блок схема показані на рис. 10.5, г, 10.6. Призначення виводів DS1821: 1 (GND) - загальний; 2 (DQ) - вхід/вихід для операцій програмування або вихід термостата при двохпозиційному

регулюванні і сигналізації; 3 (VDD)- напруга живлення +5 В. Прилад виготовляється в трьох видах корпусів PR35, TO220, 8-pin SOIS.

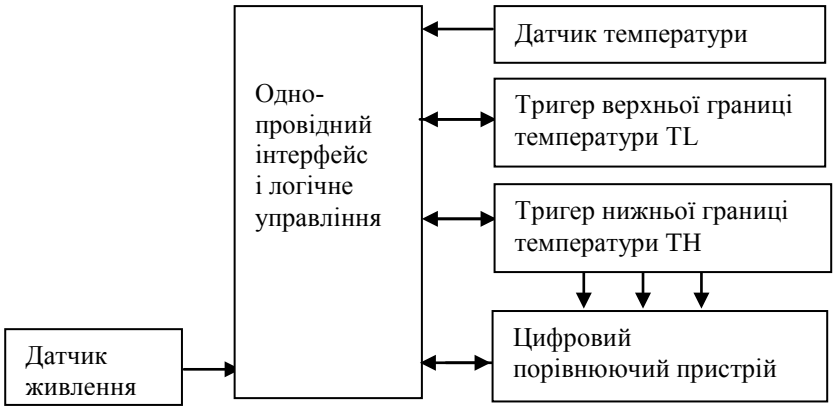


Рис.10.6. Функціональна схема термостата DS1821

Термостат може працювати в режимах вимірювання температури, двопозиційного регулювання температури і сигналізації, та в режимі програмування. Зв'язок з DS1821 здійснюється через вихід DQ. При програмуванні використовуються команди, основні функції яких такі. Запис та зчитування температури, запис верхнього TH і нижнього TL порогів температури при двопозиційному регулюванні та сигналізації, початок та кінець перетворень температури, перехід із однопровідникового режиму в термостатний і навпаки.

В однопровідниковому режимі вивід DQ може бути з'єднаний з мікропроцесором. Мікропроцесор може записати граничні значення температури TH і TL, щоб установити зону неоднозначності термостата. Ці значення температури визначаються користувачем і запам'ятовуються в довгостроковій пам'яті пристрою.

У режимі вимірювання DS1821 може вимірювати температуру від – 55 ^{0}C до + 125 ^{0}C з дискретністю 1 ^{0}C. Для вимірювання використовується вбудований датчик температури. Зчитування температури здійснюється у 8-бітовому двійковому коді. Результати вимірювань послідовно передаються по однопровідниковому інтерфейсу відповідно до протоколу передачі.

Таблиця 10.10

Рекомендовані параметри DS1821

Параметр	Символ	Мін., В	Макс.,В
Напруга	VDD	2.7	5.5
Вивід даних	DQ	–0.5	5.5
Логічна 1	VIH	2.0	VDD+0.3
Логічний 0	VIL	–0.3	+0.8

У термостатному режимі вивід DQ стає виходом термостата. Цей вивід з відкритим стоком перейде в активне положення, коли температура DS1821 перевищить установлену границю TH, і буде залишатися активним доти,

поки температура не понизиться до запрограмованої нижньої границі TL. В табл.10.10 наведені рекомендовані параметри постійного струму.

Термостат не потребує зовнішніх складових, має малу постійну часу (максимальний час перетворення 1 с), невеликі масу та розміри.

В якості напівпровідникових термодатчиків можуть бути використані напівпровідникові елементи діоди, транзистори та ін.

Застосування напівпровідникових елементів для вимірювання температури ґрунтується на вольт-амперній характеристиці діода, відомою як рівняння Шокли або рівняння ідеального діода, а саме:

$$I = I_o \left[e^{(qV/kT)} - 1\right],$$

де I_o - струм насичення (чи струм витоку); q - заряд електрона; V - напруга, що прикладається до діода; k - постійна Больцмана; T - температура, К.

Таблиця 10.11

Характеристики перетворювачів температури

Назва (тип)	Виробник	Вимірювана температура,°C	Похибка	Тип корпусу	Тип вихідного сигналу
AD22100KT	Analog Devices	0 ~ 100	±0.5	TO-92	Voltage
AD592AN	Analog Devices	0 ~ 125	±1.5°C	TO-92	Current
ADT7301ARTZ-500RL7	Analog Devices	-20 ~ 100	±1°C	SOT-23-6,SOT-6	Internal
TMP01ES	Analog Devices	-55 ~ 125	±0.5°C	8-SOIC	Open Collector
LM35CZ/NOP	National Semiconductor	-20 ~ 125	±1°C	TO-92	Voltage
LM26CIM5-ZHA	National Semiconductor	-20 ~ 125	±3°C	SC-74A,SOT-753,SOT-23-5	Active Low/Open Drain, Voltage
LM94022BIM	National Semiconductor	-50 ~ 150	±2.7°C	6-TSSOP,SC-88A,SOT-353,SC-70-5	Push-Pull
DS18S20Z+	Maxim	-55 ~ 125	±0.5°C	SOIC-8-3.9	Digital
DS1631S+	Maxim	-55 ~ 125	±2°C	SOIC-8-5.3	Internal
MAX6576ZUT+T	Maxim	-40 ~ 125	±0.8°C	SOT-23-6,SOT-6	Clock
700-102AAB-B00	HONEYWELL	-70 ~ 500	±0.12%	аналоговый, RTD, 1000	NONE
700-101BAA-B00	HONEYWELL	-70 ~ 500	±0.06%	аналоговый, RTD, 100	NONE
HEL-707-T-0-12-00	HONEYWELL	-75 ~ 540	±0.2%	аналоговый, RTD, 100	NONE
B57301K0103A001	EPCOS	-30 ~ 110	±2%	см. datasheet	NONE
NTC-K45-1.0(B57045K)	EPCOS	-20 ~ 125	±10%	см. datasheet	NONE
LM335AZ	STMicroelectronics	-40 ~ 100	±1%	TO-92	Voltage
STLM20W87F	STMicroelectronics	-55 ~ 130	±1.5°C	6-TSSOP,SC-88A,SOT-353,SC-70-5	Voltage
TC6501P125VCT	Microchip Technology Inc	0 ~ 125	±0.5°C	см. datasheet	Active Low/Open Drain
MCP9700A-E/TO	Microchip Technology Inc	-40 ~ 125	±1°C	TO-92	Voltage
MCP9509CT-E/OT	Microchip Technology Inc	-40 ~ 125	±0.5°C	SC-74A,SOT-753,SOT-23-5	Open Drain
TMP20AIDCKT	Texas Instruments	-55 ~ 130	±2.5°C	6-TSSOP,SC-88A,SOT-353,SC-70-5	Voltage
TMP103AYFFT	Texas Instruments	-40 ~ 125	±1°C	4-UFBGA, DSBGA	Digital

Зміна будь-якої величини, яка викликає зміну приведеного виразу, може бути використана для зміни струму, що протікає через p- n -перехід. Так, діод

можна використати як перетворювач температури, оскільки струм витоку напівпровідника змінюється у залежності від температури. Значення струму зростає з температурою за експоненціальним законом зі швидкістю близько 10%. $К^{-1}$. Струм витоку кремнію складає приблизно 25 нА при температурі 25 °С і збільшується до 6.5 мА при температурі 150,°С

Однак, діапазон температур, в межах яких можливе таке використання, досить обмежений. Верхня температурна межа застосування визначається температурою теплового пробою.

Найчастіше для вимірювання температури використовується пряма напруга на p-n переході при майже постійному струмі емітера. Тут маємо істотні переваги: лінійність температурної залежності, широкий діапазон робочих температур, висока стабільність. Зміна прямої напруги складає близько 2,5 мВ.$К^{-1}$. При підвищенні температури транзисторів p-n-p типу напруга емітер-база з області позитивних значень переходить в область негативних.

Серед відомих напівпровідникові термодіоди Д7А-Д7Ж, термотранзистори МП40, П14, Д237Г та ін. Пропорційна залежність напруги на транзисторах від абсолютної температури дає можливість реалізувати досить точний датчик. Переваги таких датчиків -- простота і низька вартість, мала похибка. Крім того, ці датчики можна формувати прямо на кремнієвої підкладці. Все це робить напівпровідникові датчики дуже затребуваними.

Характеристики перетворювачів температури окремих провідних виробників наведені у табл.10.11.

Інфрачервоні перетворювачі температури

Температурні перетворювачі можна розділити на розглянуті вище контактні, та робезконтактні. Безконтактні датчики використовують принцип вимірювання потужності інфрачервоного випромінювання об'єкта (холодний чи гарячий) і використовуються для вимірювання температури у важкодоступних місцях, високих температур (від 1500 до 3000 °С), температури прозорих об'єктів та ін.

Принцип з роботи інфрачервоних (ІЧ) датчиків температури заснований на тому, що будь-яке тіло при температурі вище абсолютного нуля випромінює електромагнітну енергію. Для вимірювання в різних діапазонах температур використовуються різні ділянки інфрачервоного спектра. При низьких температурах це випромінювання в інфрачервоному діапазоні, при високих температурах частина енергії випромінюється вже у видимій частині спектру. Інтенсивність випромінювання безпосередньо пов'язана з температурою нагрітого об'єкта. Випромінювальна здатність матеріалу пов'язана з коефіцієнтом відбивання формулою:

$$E = 1 - R,$$

де E - випромінювальна здатність, R - коефіцієнт відбиття.

Особливість вимірювання температури ІЧ термометрами полягає в тому, що матеріали з різною структурою поверхні мають різну здатність випромінювати і поглинати енергію. Коефіцієнт випромінювання

визначається відношенням енергії, випромінюваної об'єктом при заданій температурі, до енергії, випромінюваної абсолютним випромінювачем при тій же температурі. Коефіцієнти випромінювання коливаються в межах від 0.1 до 1.0. Наприклад, для матеріалів - алюміній, золото, вольфрам, метал, здатність відбивання буде 70-80%, а для паперу, води, цегли 10-20%. Значення коефіцієнта випромінювання EMS (Emissivity) для деяких матеріалів наведені в табл.10.12. І якщо в пірометрі немає можливості підстроювання EMS, то для різних матеріалів виміряна температура буде сильно відрізнятися від реальної.

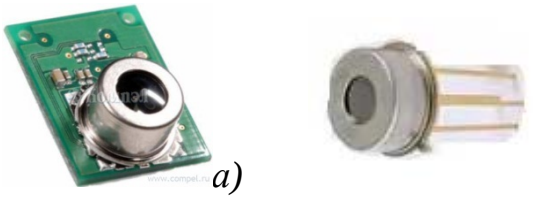
Таблиця 10.12

Значення коефіцієнта випромінювання EMS

Матеріал	Коефіцієнт EMS	Матеріал	Коефіцієнт EMS
Азбестова тканина	0,7	Мідь полірована	0,01
Алюміній полірований	0,05	Мідь окислена	0,65
Алюміній окислений	0,25	Резина	0,93
Бетон	0,54	Папір білий	0,9
Бронза полірована	0,1	Папір чорний	0,94
Бронза пориста	0,55	Скло	0,82
Вода	0,88	Сніг	0,8
Залізо поліроване	0,28	Сталь катана	0,56
Залізо прокат	0,77	Сталь іржава	0,69
Золото поліроване	0,02	Фарфор	0,92
Лід	0,97	Цегла	0,85

Діапазон вимірювань температур безконтактними датчиками складає від -45 ° С до +3000 ° С. Причому в діапазоні високих температур інфрачервоним датчикам немає конкуренції. Основні переваги: малий час відгуку (це найшвидкісні датчики температури), можливість вимірювання температури рухомих об'єктів, вимірювання високих температур, вимірювання у важкодоступних і небезпечних місцях, вимірювання без безпосереднього контакту з об'єктом (дистанційні вимірювання), малі розміри і великий термін служби. Основні недоліки: чутливість до забруднення, до впливу стороннього світла, світлового фону, а також до температури.

Японська компания OMRON виготовляє ІЧ датчики температури серії D6T для діапазону температур 5…50 ^{o}C. Датчики виготовляються у вигляді невеликих друкованих плат розміром 18x14 мм^2, рис.10.7, а, на яких встановлено герметичний корпус з самим датчиком, інтерфейсний контролер і роз'єм для підключення. Датчик складається з кремнієвої лінзи, яка фокусує теплове випромінювання на масив чутливих термопарних комірок і спеціалізованої схеми, що здійснює обробку сигналів.



а) *б)*

Рис.10.7. Датчики температури:
а – OMRON D6T-8L-06; б – Thermopiles TS118-3

Чутливі комірки в моделі датчика D6T-44L-06 виконані у вигляді матриці 4×4, а в моделі D6T-8L-06 у вигляді матриці 1×8. Матриця дозволяє отримувати інформацію про розподіл температури на площині, за яким, наприклад, можна визначити положення об'єкта (або кількох) в контрольованому приміщенні, теплові аномалії обладнання, місця локальних перегрівів. Висока швидкість реакції датчика дозволяє також відслідковувати переміщення об'єктів або зміну їх температури. Характеристики: точність вимірювання ±1,5 ^{o}C, цифровий вихід, обмін по шині за стандартним протоколом I²C зі швидкістю до 100 Кбит/с. Напруга живлення 4.5…5.5 В; Струм живлення 5 мА. Вага датчика 4.746 г.

Фірма HL-Planartechnik GmbH пропонує сенсори Thermopiles TS118 моделей 1-5, 10 інфрачервоного випромінювання, рис.10.7, б. У стандартному виконанні сенсори поставляються як «один-елемент-детектор» або як «вісім-елементів-рядок». За рахунок зміни оптичних компонентів фільтра і лінзи сенсор може бути налаштований індивідуально на певний діапазон спектр (довжину хвилі) випромінювання. Сенсор має дві пари виходів. На одній парі вимірюється напруга на виході сенсора. Друга пара призначена для під'єднання до терморезистора (Nickel RTD або NTC) для вимірювання температури навколишнього середовища. Параметри датчика TS118-3: Діапазон робочих температур -20 + 100 °C. Постійна часу 20 ± 5 с. Поле зору 120°. Фільтр: 8-14 μm. Зона амортизатора: 0.7 × 0.7 mm ².



Рис.10.8. Пірометр ДПР-1

ГСКТБ Інституту фізики НАН України серійно випускає пірометри спектрального відношення (двоколірні) ДПР-1, рис.10.8, призначені для безконтактного вимірювання температури нагрітих об'єктів (металів, сплавів, скла, пластмас та ін.) у діапазоні від 300 ºС до 3500 ° С з точністю вимірювання ± 5 ºС по всьому вимірюваного діапазону на відстанях від 0,4до 50 м. Вимірювання температури нагрітих об'єктів здійснюється незалежно

від їх випромінювальної здатності (значення коефіцієнта EMS). Обладнаний лазерним цілевказівником. Методика вимірювання базується на використанні залежності відносини енергетичних яскравостей у двох спектральних зонах від температури. Розрахунок цього відношення, врахування температури навколишнього середовища та аналіз результатів пікового детектора заносяться в програму і вводяться в мікропроцесор, який дає можливість високоточної обробки і корекції вимірювань.

Результати вимірювань виводяться на цифровий індикатор і на роз'єми в аналоговій формі з струмом від 4 до 20 мА і в цифровій через RC485 або RC232. Протокол зв'язку пірометра сумісний з системою команд функціональних модулів серії I–7000 фірми ICP DAS.

Пірометри забезпечують: незалежність результатів вимірювання від стану навколишнього середовища (забруднення сторонніми газами, водними парами, пилом, тощо); незалежність точності вимірювання від поверхні об'єкта (наявність часткового забруднення оксидами, шлаками тощо); можливість точного вимірювання температури для рухомих, вібраційних об'єктів. Пірометри сертифіковані і занесені до Державного реєстру України.

Пірометр **Testo** 845 (Німеччина) призначений для точних вимірювань температури на коротких і великих (до 20м) відстанях, рис.10.9, а. Він оснащений оптикою зі змінною фокусною відстанню від 1:1 до 75:1. При цьому, наприклад, діаметр вимірюваної області складає 1 мм з відстані 70 мм (короткий фокус) або 28 см з відстані 10 м (на довгому фокусі 75:1).



а) *б)*

Рис.10.9. Пірометри:
а - testo 845, б - Benetech GM 320-EN-01

Пірометр оснащений хрестоподібним чотириточковим лазерним цілевказівником. Забезпечує відображення на дисплеї максимально/мінімального/миттєвого значень. Точність вимірювань становить 0,75 ^{o}C для безконтактних (ІЧ) вимірів. Швидкість проведення вимірювань становить 10 вимірювань в секунду. Додатково до приладу можна підключити зонд для контактного вимірювання температури на поверхні, температури повітря, рідин і гелеподібних середовищ.

Testo 845 має опцію з вбудованим модулем вологості для одночасного вимірювання відносної вологості повітря, поверхневої вологості і розрахунку поверхневої точки роси. При високій (100 мс) швидкості сканування поверхні можна дистанційно виміряти температуру поверхні (наприклад, стін), розраховувати точку роси на поверхні і безконтактно визначити вологі місця. При значеннях відносної вологості та точки роси, які перевищують допустимі, прилад автоматично подає звуковий сигнал і виводить відповідне повідомлення на дисплей.

Пірометр оснащений функціями документування даних:

вбудованою пам'яттю на 90 вимірювань;

друком на портативному принтері testo;

передачею даних на ПК в режимі он-лайн або з пам'яті приладу за допомогою ПЗ Easy Climate.

Технічні характеристики пірометра testo 845 наведені у табл.10.13.

Таблиця 10.13

Характеристики пірометра testo 845

Параметр	Значення
Діапазон вимірювань, ІЧ, °С	-35…+950
Діапазон вимірювань, контактний зонд, °С	50…+600
Діапазон вимірювань відносної вологості, %	0…100
Похибка ІЧ, °С	от ±0,75
Похибка, контактний зонд, °С	±2,
Похибка, відносна вологість,%	±2
Швидкодія, с	0,15
Вбудована пам'ять, кількість вимірів	90
Оптика	75:1
Оптика	1:1
Робоча температура, °С	-20...+50
Розміри, мм	155 x 58 x 195
Вага, гс	465

Пірометр **Benetech** (Китай) GM 320-EN-01 - це портативний інфрачервоний термометр пістолетного типу з лазерним покажчиком для безконтактного вимірювання температури в діапазоні від -50 до 380 °С, рис.10.9, б. Тип візуалізації результатів вимірювань – текстово-цифровий. Прилад компактний, легкий, недорогий. Пірометр Benetech GM900 забезпечує налаштування коефіцієнта теплового випромінювання (EMS) матеріалів у діапазоні від 0,1 до 1 з кроком 0,01. Пірометр GM900 має функції лазерного наведення по одній точці, утримання лазерної мішені,

вибір MAX/MIN/AVG/DIF, High/Low, сигналізацію Temperature alarm, вбудовану пам'ять на 12 вимрів.



Рис.10.10. Пірометри TROTEC TP7 і BP21

Пірометри **TROTEC** TP7, BP21, рис.10.10, BP25 (Німеччина) мають функції макс./мин. температура; звукової сигналізації перевищення макс./мін. значень (регульовану); регульований коефіцієнт емісії EMS; функцію сканування і утримання даних; підсвітки дисплею, ввімкнення/вимикання лазера; автоматичне відключення через 10 сек. Подвійний лазер автоматично візуалізує розмір плями в залежності від відстані вимірювання. TROTEC BP25 - пірометр з вбудованим гігрометром для безконтактного вимірювання температур поверхонь і вологості повітря. Включає в себе такі функції, як: вимірювання температури поверхонь, вологості повітря, точки роси (діапазон: температура -50...+260 °C; вологість: 0...100 %; точка роси: -30...+100 °C).

Прилади відповідають стандартам EN60825-1, EN610006-32001, EN6100020016-1 і вимогам існуючих європейських національних норм.



Рис.10.11. Пірометричний термометр DT-8855

На рис.10.11 показаний пірометричний термометр DT-8855. Для реєстрації результатів вимірювань термометр DT-8855 оснащений опцією бездротового зв'язку з комп'ютером, інтерфейс Wireless USB (433МГц, до 30 м), і можливістю підключення контактного датчика температури (термопари типу). Термометр також має аналоговий вихід (1мВ/^{o}F), пам'ять на 20

вимірювань. Крім цього можливе цифрове регулювання коефіцієнта EMS від 0,10 до 1,0.



Рис.10.12. Пірометр FLUS IR-866 U

Пірометр **FLUS IR-866U,** рис.10.12, **–** високотемпературний пірометр для вимірювання температур від -50°С до 2250°С. Передбачена можливість корекції коефіцієнта випромінювання в діапазоні від 0,1 до 1,00, а також встановлення рівнів тривог при високій і низькій температурі та індикація максимального, мінімального, диференціального значень. Пірометр обладнаний лазерним цілеказівником, підсвіткою дисплея LCD. Забезпечена можливість передачі результатів вимірювань на ПК через USB-з'єднання.

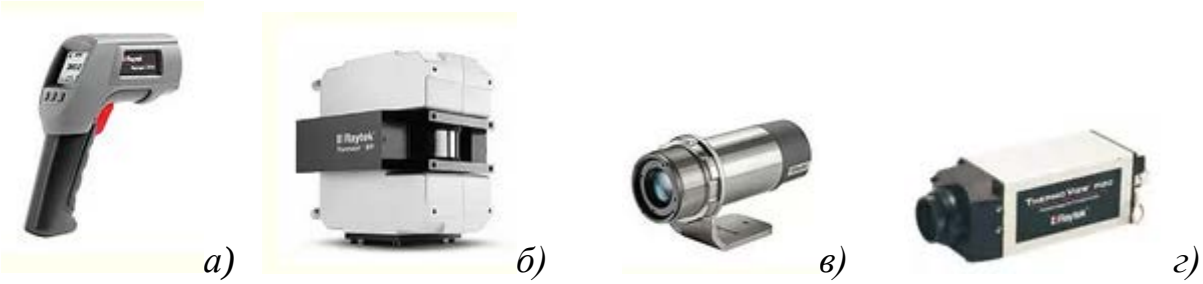
Характеристики описаних вище пірометрів наведені у табл.10.14.

Таблиця 10.14

Характеристики лазерних пірометрів

Параметр/Тип	**GM 320**	**GM900**	**TP7**	**BP21**	**DT-8855**	**Flus IR-866u**
Діапазон, ^{o}C	-50… +380	-50…+900	-50...+1000	-35...+800	-50…+1050	-50…+2250
Час відгуку, с	0,5	0,5	0,15	0,3	1	0,25
Точність, (%) ^{o}C	(1.5)	± 1,5	(1.5)	±2	(1.5)	(±2),±2
Роздільна здатність, ^{o}C	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1-1
Оптична роздільна здатність (DS)	12:1	12:1	30:1	12:1	30:1	50:1
Коефіцієнт EMS	0.95	0,1...1,0	0,1...1,0	0,1...1,0	0,1...1,0	0,1...1,0
Розміри, мм	175 x 100 x 50	153 x 101 x 43	104x43x146	160x82x42	100x56x230	192x126x60
Вага, г		147	163	177	290	300

Компанія Raytek (США) випускає повну лінійку інфрачервоних вимірювальних приладів температури для управління технологічними процесами в діапазоні від - 50ºС до + 3000ºС. Це портативні пірометри різних моделей, які дозволяють миттєво вимірювати температуру на відстані і використовуються з метою профілактики, діагностики та контролю, рис.10.13, а. Це серія лінійних сканерів, які дозволяють сканувати температурне поле вздовж лінії, забезпечуючи точне вимірювання, контроль і аналіз температури в жорстких умовах, в діапазоні температур від 20 до 2000ºС з високою швидкістю сканування, рис.10.13, б.



а) *б)* *в)* *г)*

Рис.10.13. ІЧ-прилади компанії Raytek:

а - пірометр, б - лінійний сканер, в - датчик серии Marathon, г - тепловізор.

Перетворювачі Raytek серії Compact забезпечують вимірювання температур в діапазоні від - 40 до 1800ºС. Датчики серії Marathon призначені для роботи у важких і небезпечних умовах з діапазоном температур від -40 до 3000ºС, рис.10.13, в. Серія включає моделі з одно- і двоколірним режимом вимірювання, короткохвильові/низькотемпературні термометри, оптико-волоконні радіаційні термометри. Датчики серії Thermalert з діапазоном температури від -18 до 2000ºС містять повний набір вимірювальних систем - первинний і вторинний перетворювачі, які вимірюють з високою точністю температуру в гарячих, рухомих або недоступних для контакту матеріалів.

Тепловізори

Останнім часом у сільськогосподарському виробництві, як і в інших галузях народного господарства, широко використовуються прилади дистанційного теплового контролю (тепловізори). **Тепловізор** (інфрачервона камера) - вимірювальний прилад, який працює в інфрачервоній області електромагнітного спектру і "переводить" у видиму область спектру власне теплове випромінювання об'єктів. Тепловізор може використовуватися і як прилад для безконтактного вимірювання температури. На відміну від пірометра, який вимірює температуру тільки в одній точці, тепловізор може дистанційно вимірювати температуру на поверхні об'єкта у багатьох точках і на підставі виміряних значень формувати теплове зображення об'єкта. Розподіл температури на поверхні об'єкта відображається як кольорова картинка, де різним температурам відповідають різні кольори.

Принцип роботи тепловізора полягає в наступному. Всі тіла, температура яких вища за температуру абсолютного нуля, у відповідності з законом Планка випромінюють електромагнітне теплове випромінювання. Спектральна густина потужності випромінювання (функція Планка) має максимум, довжина хвилі якого залежить від температури. Положення максимуму у спектрі випромінювання з підвищенням температури зміщується в бік менших довжин хвиль (закон зміщення Віна). Тіла, нагріті до температури оточуючого середовища (-50..+50 градусів Цельсія) мають максимум випромінювання в середньому інфрачервоному діапазоні (довжина хвилі 7...14 мкм).

Тепловізори, як правило, будуються на основі спеціальних матричних датчиків температури - болометрів, які являють собою матрицю мініатюрних

тонкоплівкових терморезисторів. Інфрачервоне випромінювання, зібране і сфокусоване на матриці об'єктивом тепловізора, нагріває елементи матриці у відповідності з розподілом температури спостережуваного об'єкта. Т. ч., матриця перетворює інфрачервоні сигнали в електричні імпульси, які після підсилення перетворюються у відеосигнал. Оскільки звичайне оптичне скло непрозоре в середньому ІЧ діапазоні, оптику тепловізорів роблять із спеціальних матеріалів. Найчастіше це германій.

Просторова роздільна здатність комерційно доступних болометричних матриць досягає 1280*720 точок. Температурна роздільна здатність сучасних тепловізорів сягає сотих часток градуса Цельсія.

Розрізняють тепловізори для спостережень і вимірювальні. Тепловізори для спостережень. показують тільки градієнти температур об'єкта. Вимірювальні тепловізори дозволяють виміряти значення температури заданої точки об'єкта з точністю до коефіцієнта випромінювання.



Рис.10.14. Тепловізори:

а- Fluke Ti32; б - Testo 890; в - FlirE60**;** г - Dali T8; д- IR-60 ; е - Pulsar Quantum HD 50S

Компанія Raytek пропонує тепловізори для досліджень рухомих і стаціонарних об’єктів технологічних процесів, рис.10.13, г.

Тепловізори знаходять широке застосування на підприємствах, де необхідний контроль за тепловим станом об'єктів, при оцінці тепловтрат у виробничих і житлових приміщеннях, вимірюваннях теплоізоляційних властивостей матеріалів, виявлення несправностей мереж різного призначення і, звичайно, в оборонній галузі, медицині та ін.

Тепловізори знаходять широке застосування на підприємствах, де необхідний контроль за тепловим станом об'єктів, при оцінці тепловтрат у виробничих і житлових приміщеннях, вимірюваннях теплоізоляційних

властивостей матеріалів, виявлення несправностей мереж різного призначення і, звичайно, в оборонній галузі, медицині та ін.

Таблиця 10.15

Основні характеристики тепловізорів

Парамерт/тип	**Fluke Ti32**	**T8**	**Testo 890**	**FlirE60**	**IR-60**	**Pulsar Quan.HD 50S**
ІЧ роздільна здатність	320 x 240	384x288	620×480	320 × 240	60x60	384x288
Дисплей, дм	3,7	3,6	4,3	3,5	2,4	OLED
Кут огляду, град	46x34	25x19	42x32	45x34	20x20	11x8,3
Оптичне збільшення, раз			3	4		2,8
Фокусна відстань, м	Smart Focus	>0,5	0,1-0,5	0,5	0,5	>5
Просторова роздільна здатність, млрад	1,25	1,37	1,15	1,36		
Теплова чутливість (NETD),°С при 30 °С	<045	≤0,06	0,04	0.05	0,15	
Відеокамера	+	+	+	+	+	
Температурний діапазон, °С	-20…+600	-20…+2000	-30…+1200	-20…+650	-20…+300	-25…50
Похибка, °С (%)	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	
Частота кадрів, Гц	9	50	9; 33	60	6	30
Кольорова палітра, кількість	8	11	8		7	
Коефіцієнт випромінювання	0,01 до 1,0	0,01 до 1,0	0,01 до 1,0	0,01 до 1,0	0,1 до 1,0	
Розміри, мм	277x122x170	105x245x230	253x132x111	244x95x140	212x95x62	207x86x59
Маса, г	1050	1000	1630	575	320	430

На ринку України широко представлені наступні моделі тепловізорів.

Тепловізори **Fluke** Ti32 (США), рис.10.14, а, табл.10.15, – тепловізори для інженерів, забезпечують автоматичне вирівнювання (коригування паралаксу) візуального та інфрачервоного зображень; за рахунок високої (0,045 °С) теплової чутливості виявлення найменших відхилень температури, які часто є ознаками можливої несправності; сигналізацію при високій температурі, яка встановлюється користувачем. Для виконання спеціальних робіт в наявності є додаткові телеоб'єктиви і ширококутні об'єктиви. Для кожного знятого зображення можна записати голосові коментарі, які зберігаються разом із зображеннями. Карта пам'яті SD Memory Card (2 Гб) вміщує не менше 1200 повних інфрачервоних радіометричних зображень (.is2) і пов'язаних візуальних зображень, звукові анотації тривалістю 60 с для кожного зображення. Дані з карти можна завантажити в комп'ютер через пристрій зчитування USB. Для аналізу даних використовується ПЗ Smart View. Тепловізор є ударостійким при падінні з висоти 2 м, захищений від впливу пилу і води – ступінь захисту IP54.

Тепловізори **Testo** 890 (Німеччина) з високоякісною германієвою оптикою дозволяють провести тепловізійну зйомку навіть найдрібніших деталей або об'єктів, розташованих на значній відстані, рис.10.14, б, табл.10.15. Завдяки стандартному об'єктиву з кутом зору 42° можна зробити

чіткий знімок великої ділянки, провести діагностику великих об'єктів. Технологія Site Recognition (розпізнавання точок виміру) – забезпечує розпізнавання, розподіл та управління об'єктами при повторних вимірах або вимірюваннях схожих об'єктів). Пристрій має спеціальний режим вимірювання вологості за допомогою радіозонда. Майстер створення панорамних зображень дозволяє створити цілісне зображення об'єкта з його окремих знімків. Функція Sequence Capturing (реєстрації послідовностей знімків) дозволяє спостерігати, документувати і аналізувати стадії теплових процесів, а також здійснювати експорт даних у формат .xls і .mpeg без підключення тепловізора до ПК і використання ПЗ IRSoft. SD-карта 2 Гб забезпечує збереження 800-1,000 зображень. За допомогою інтерфейсу USB 2.0 термографічні відеозаписи можуть бути передані на ПК.

Тепловізори **FLIR** E-series, рис. 10.14, в, табл.10.15, створені на базі кращих детекторів виробництва FLIR Systems (США) з чутливістю до 0,05 °С. Зйомка проводиться в реальному часі з частотою 60 Гц, що дозволяє знімати рухомі об'єкти і процеси в динаміці. Через Bluetooth (функція) MeterLink до тепловізора можна підключити гігрометр Extech MO297 або струмовимірювальні кліщі Extech EX845. Функція анотації дозволяє користувачам додавати голосові коментарі через гарнітуру Bluetooth і текстові примітки за допомогою тачскрін клавіатури.

Радіометричні зображення JPEG зберігаються на SD-карті, є композитний відео і USB-mini виходи. Програма Instant Report – дозволяє створювати звіти у форматі PDF і виводити їх на друк безпосередньо з камери. Завдяки можливості підключення тепловізора по Wi-Fi до таких мобільних пристроїв, як iPad, iPhone, можна прямо з мобільного пристрою відправити звіт про результати вимірювання.

Тепловізори **DALI** Т-серії (Китай), рис. 10.14, г, табл.10.15, представлені двома моделями - Т4 і Т8. Основні відмінності між цими приладами - в роздільній здатності матриці (384x288 у моделі Т8 і 160x120 у моделі Т4) та діапазоні вимірюваних температур -20С... +650 ^{o}С з можливістю опціонального розширення до +1200 ^{o}С або +2000 ^{o}С у моделі Т8 і -20...+350 ^{o}С з можливістю опціонального розширення до +650 ^{o}С у моделі Т4). Відмінною рисою тепловізорів Т4 і Т8 від попередніх моделей компанії Dali є наявність функції відеозапису. Використовується карта пам'яті Micro SD (8Г), максимальна підтримка до 32Г. Пристрої забезпечують збереження: ІЧ зображень у форматах JPEG, H. 264 з вихідними даними вимірювання; відео зображень у форматах JPEG, H. 264, пов'язаними з відповідним ІЧ-зображеннями (кадр в кадрі); текстових анотацій тривалістю до 60с (вбудований мікрофон або через Bluetooth гарнітуру). Виходи: відео PAL / NTSC; аудіо; передача даних; Bluetooth гарнітура / RS232). Тепловізор має мережний інтерфейс з функцією установки IP адреси для передачі зображень і відео в режимі реального часу.

IR-60 – тепловізійна камера, яка поєднує функції вимірювання температури поверхні та формування теплового зображення в реальному часі, рис. 10.14, д, табл. 10.15. Для покращеного розпізнавання тепловізор має

камеру, яка формує візуальні зображення. Залежно від практичних вимог він може перетворити теплове зображення на візуальне. Налаштування коефіцієнта випромінювання та компенсації температури фону дає змогу підвищити точність вимірювань температури поверхонь; маркування гарячих і холодних точок допоможе знайти найгарячішу та найхолоднішу ділянку теплового зображення; є можливість вибору кольорової палітри. Карта пам'яті - mini-SD, файловий формат - bmp. Вартість тепловізора знаходиться у низькому ціновому сегменті.

Тепловізор **Pulsar Quantum HD 50S** (Білорусь)- тепловізійна камера для проведення розвідувальних і рятувальних операцій, спостереження за дикою природою, орієнтування на місцевості та ін. Модель з об'єктивом великого діаметру і морозостійким дисплеєм, рис. 10.14, е. Тепловізор здатний розпізнавати об'єкти крізь атмосферні опади, задимленість і чагарники на відстані до 1250 метрів. На такій відстані тепловізор Pulsar Quantum HD50S виявляє об'єкти розміром з людини, що перевершує показники багатьох приладів такого класу. Всі моделі Quantum HD 50S оснащені аналоговим відеовиходом для підключення зовнішніх пристроїв запису, або виведення зображення на екран. Основні характеристики тепловізора наведені у табл.10.15.

10.3. Первинні перетворювачі вологості

Кількісна оцінка вмісту вологи в повітрі, с.г. матеріалах і продуктах визначається величинами: вологовмістом, абсолютною і відносною вологістю.

Вологовміст повітря **d** [кг/кг, або г/кг] дорівнює масі $M_п$ водяної пари (1 кг), яка припадає на одиницю маси (1 кг) сухої частини повітря. Вологовміст визначає відношення густини водяної пари в повітрі до густини власне повітря.

Абсолютна вологість повітря $\boldsymbol{\rho}$ [кг/м^3] дорівнює масі водяної пари, що міститься в одиниці об'єму вологого повітря (парогазової суміші). Величина **ρ** як правило виражається в грамах на 1 м^3 вологого повітря [г/м$^3_{волог.}$] і характеризує густину водяної пари.

Відносна вологість повітря R[%] – величина, яка характеризує ступінь насичення повітря водяними парами. Вона дорівнює відношенню парціального тиску водяної пари, що міститься у повітрі, до парціального тиску насиченої водяної пари при одній і тій же температурі і визначається за формулою:

$$R = (p_п / p_н)\cdot 100\%,$$

де $p_п$ [Па] - парціальний тиск водяної пари в повітрі, $p_н$ (Т) [Па] – тиск пари, що знаходиться в рівновазі з рідкою водою при температурі Т. Так $p_н$ - це максимальне значення, яке може приймати парціальний тиск пари $p_п$ при температурі Т, далі вже відбувається конденсація.

Температура точки роси T_d [ºС] – це температура, до якої необхідно охолодити вологе повітря, щоб досягти насичення, зберігаючи постійним

вміст (масу) вологи в процесі охолодження. При температурі точки роси $p_п = p_н$.

Вологість твердих і сипучих матеріалів визначають або вмістом вологи в кілограмах води на 1 кг абсолютно сухого матеріалу $[1кг_{води}/1кг_{абс.сух.мат.}].100\%$, або вологістю $[1кг_{води}/1кг_{волог.\ мат.}]•100\%$.

Методи вимірювання вологості повітря (газів), речовин і матеріалів досить численні і різноманітні. Найбільш древній і простий метод ґрунтується на властивості волосся змінювати довжину при зміні вологості повітря. Перетворювач вологості являє собою звичайне волосся, натягнуте між двома пружинами. Незважаючи на простоту такого датчика й на те, що процес, який лежить в основі вимірювань не піддається розрахунку, гігрометри з волосяними датчиками виготовляються у великій кількості.

До методів вимірювання, які умовно відносять до прямих, можна віднести гравіметричний метод, який полягає у виділенні вологи з речовини й роздільному вимірюванні маси вологої речовини і її сухої частини або виділеної вологи. В залежності від способу виділення вологи метод поділяється на випарно-гравіметричний (заснований на випарному способі видалення вологи з твердих речовин), термогравіметричний (заснований на видаленні вологи з речовини шляхом її нагрівання), вакуумно-гравіметричний (заснований на вакуумному способі видалення вологи з речовини).

Широке практичне застосування для вимірювання вологості повітря, газів і деяких матеріалів мають такі основні методи: а) психометричний, заснований на залежності охолодження чистої води, яка випаровується в газовий простір, від вологості останнього; б) температурно-рівноважний, заснований на залежності різниці пружностей водяної пари над насиченим водним розчином гігроскопічної солі і над чистою водою від вологості газу над розчином; в) методи, засновані на залежності фізичних гігроскопічних властивостей твердих тіл від вологості повітря (газу), з якими вони перебувають у стані динамічної гігротермічної рівноваги. Основні труднощі при вимірюванні вологості пов’язані з її функціональною залежністю від температури і парціального тиску водяних пар.

Існують і інші методи вимірювання вологості, засновані на безпосередньому вимірюванні тих чи інших фізичних властивостей газів, матеріалів. Кількість таких методів, які застосовуються лише в окремих випадках, досить велика. Представляють певний інтерес методи поглинання вологим газом (матеріалом) ІЧ радіації; поглинання енергії електромагнітних хвиль ВЧ і НВЧ діапазонів; поглинання енергії β-випромінювань; методи вимірювання теплопровідності, густини, швидкості дифузії крізь напівпроникні перегородки та ін.

Загальну характеристику основних методів вимірювання вологості можна подати у вигляді табл. 10.16.

Таблиця 10.16

Методи вимірювання вологості

Метод вимірювання		Вимірювальний параметр
Група	Принцип	
Прямі	Гравіметричний (випарно-, термо-, вакуумно-гравіметричні)	Маса, об’єм
Непрямі	Психрометричний	Різниця температур
	Конденсаційний (точка роси)	Температура конденсації пари води
	Сорбційні (кулонометричний, електролітичний)	Електричний струм, температура насичення
Електричні	Резистивний	Електричний опір
	Ємнісний	Ємність, діелектрична проникність
Електро-магнітні	П’єзосорбційний	Частота коливань
	Геофізичний (георадар)	Діелектрична проникність
	Надвисокочастотний	Амплітуда, фаза, поляризація
Радіаційні	Нейтронний	Сповільнення нейтронів
Оптичні	Фотометричний,інфрачервоний	Довжина хвилі, інтенсивність світлового потоку

У с.г. технологічних процесах найчастіше використовуються вимірювання вологості повітря, ґрунту, продуктів та матеріалів.

10.3.1. Перетворювачі вологості повітря

Прилади, призначені для вимірювання вологості повітря, у тому числі і первинні перетворювачі, називають гігрометрами. Їх можна розділити на дві групи: а) гігрометри, засновані на фізичному законі, який дозволяє безпосередньо визначати вологість; це – психрометри, конденсаційні гігрометри, сорбційні (кулонометричні, електролітичні) гігрометри, б) гігрометри, принцип дії яких заснований на вимірюванні властивостей газів, матеріалів, пов'язаних з вологістю, наприклад, імпедансні гігрометри. Названі групи гігрометрів дозволяють визначити один з параметрів вологості, описаних вище. Це такі параметри і гігрометри: а) температура точки роси T_d (°С), яка визначається конденсаційними, сорбційними і електролітичними гігрометрами, а також гігрометрами на основі оксиду алюмінію; б) температура вологого термометра $T_в$ (°С), вимірювана

психрометрами; в) відносна вологість R(%), що визначається за допомогою гігрометрів на основі зміни опору і ємності. Розглянемо ці групи гігрометрів більш детально.

Психрометри

Психрометри використовуються для визначення вмісту вологи в повітрі. Принци роботи психрометрів полягає у визначенні різниці температур двох термометрів: сухого і вологого, який зволожується дистильованою водою. Випаровування води викликає охолодження вологого термометра до температури рівноважного випаровування дистильованої води в повітря $T_в$, - температури насичення повітря. Швидкість випарування, а отже, і температура охолодження вологого термометра залежить від вмісту вологи в повітрі.

Абсолютну вологість повітря ρ - кількість водяної пари в 1 $м^3$ повітря при даній температурі і барометричному тиску, можна визначити за формулою:

$$\rho = Q-[a(T_c - T_в)B],$$

де: Q - максимальна вологість при температурі вологого термометра (кількість водяної пари для максимального насичення 1 $м^3$ повітря при заданій температурі, виражена в грамах); В - барометричний тиск в момент вимірювання; а - психрометричний коефіцієнт; T_c і $T_в$ - температура сухого і вологого термометрів.

Відносну вологість повітря вираховують за формулою: $R = \frac{\rho}{Q} \times 100\%$.

При визначенні відносної вологості за різницею температур користуються психрометричним графіком, а при визначенні абсолютної вологості користуються психрометричними таблицями. В мікропроцесорних вимірювачах вологості психрометричні таблиці і графіки подані програмним способом.

Таблиця 10.17

Характеристики вітчизняних психрометрів

Технічні характеристики	ВІТ-1	ВІТ -2	ВІТ -3	ДВТ-04
Діапазон вимірювання °t сухого термометра, °С …	0…+25	+15…+40	30…+42	0... +90
Ціна поділки шкали, °С	0,2	0,2	0,2	
Діапазон вимірювання відносної вологості (%) при температурі, °С				
+5…+25	от 20 до 90			
+20…+23	от 54 до 90			
+23…+26		от 40 до 90		
+26…+40		от 20 до 90		
+25…+42			от 27 до 93	
0... +90				10...100
Термометрична рідина	толуол	толуол	ртуть	-
НСХ				2x100M, 2xPt100, 2xPt1000
Габаритні розміри, мм …	290x120x50	290x120x50	290x115x46	80x210x68

Чутливість психрометра залежить тільки від чутливості датчиків температури. Основною перевагою є висока відтворюваність, простота і невисока вартість. До недоліків можна віднести труднощі вимірювання $T_в$ нижче або поблизу 0°С. Зовнішній вигляд перетворювача вологості психрометричного типу АО «ТЕРА» показаний на рис.10.15, а. Характеристики психрометрів ВІТ-1, ВІТ -2, ВІТ -3 та ДВТ-04 АО «Тера» наведені в табл.10.17.

Конденсаційні гігрометри

Принцип дії конденсаційних гігрометрів заснований на фіксації температури конденсації пари води T_d в газовій фазі - точки роси. Поверхню матеріалу, температура якого вимірюється, поступово охолоджують до появи роси або інею на його поверхні. Потім процес стабілізують так, щоб між повітрям і краплями роси на поверхні підтримувався рівноважний стан. Виміряна у цьому стані температура являє собою «точку роси» T_d або «точку інею» при мінусових температурах. Починаючи саме від цієї точки роси, визначають тиск пари у вологому повітрі.

Для визначення моменту утворення шару конденсату та його параметрів застосовують вимірювання за допомогою фотоелементів (фотодіодів, фоторезисторів, фототранзисторів) інтенсивності світлових потоків (у видимій і інфрачервоній областях спектру), відбитих від чистої конденсуючої поверхні та від поверхні з шаром конденсату і електричних характеристик конденсату (найчастіше поверхневий опір). Типова залежність струму датчика конденсаційного типу при наближенні до точки роси близька до експоненціальної. Для індикації шару конденсату застосовують також п’єзокварцовий резонатор, включений в схему генератора, добротність якого у момент випадання на його поверхню шару конденсату різко зменшується, що призводить до різкої зміни частоти генерації.

До переваг методу, передусім, відносяться можливість вимірювання вологості в широкому діапазоні концентрацій пари води, температури та тиску аналізованого середовища, а також градуювання датчиків за температурою, а не за вологістю. Основним недоліком конденсаційного методу являється залежність результатів від міри забрудненості поверхні.



а) б) *в)*

Рис.10.15. Перетворювач вологості психрометричного типу АО «ТЕРА» - а, та конденсаційні гігрометри:
б - Optidew (Michell Instruments Ltd); в - SIM-12H DewPro (General Eastern Instruments)

Багатофункціональний аналізатор Optidew фірми "Michell Instruments Ltd." (Великобританія) являє собою прецизійний, прилад, створений на основі конденсаційної технології, рис.10.15, б. Він складається з блоку електроніки і датчика, з'єднаних кабелем. Технічні характеристики наведені в табл. 10.18.

Таблиця 10.18

Технічні характеристики гігрометра Optidew

Назва	Значення
Охолоджувач	Одноступінчастий або двоступінчастий
Мінімальна температура точки роси (при температурі навколишнього повітря +21 °С)	з повітряним охолодженням датчика -30; (одноступінчастий) -40 (двоступінчастий)
	без повітряного охолодження датчика -24 (одноступінчастий); -29 (двоступінчастий).
Похибка вимірювання, °С	±0,2
Повторюваність, °С	0,01
Одиниці відображення вологості	°С, °F температури точки роси; % відносної вологості; г/м3; р/кг; aw; delta (T - TTP)
Дискретність відображення	0,1° для температури точки роси; 0,01 для ppmV; 0,1 м/м^3
Аналоговий вихід, мА	4-20
Цифровий вихід	RS232 (стандарт)
Реле	Конфігурується користувачем 2А 30 В , 0,5 А 120 В
Параметри аналізованого середовища: тиск, бар робоча температура,°С рекомендована витрата	 0-250 -20...+40 0,1-20 норм. л. /хв.
Напруга живлення	90-265 В, 50/60 Гц.
Габаритні розміри ,мм блок електроніки датчик	 222x200x90 129x45
Клас захисту корпусу	Cermet II: IP65 (базове виконання), IP66

В перетворювачах вологості DewPro фірми "General Eastern Instruments", Німеччина, модифікацій 1111H, 1311DR, 1311XR, D-2, SIM-12H, табл.10.19, використовується конденсаційний принцип дії, заснований на охолодженні розташованого в газовому середовищі дзеркального датчика. В якості датчика температури точки роси використовується платиновий термоперетворювач опору.

Перетворювачі відрізняються один від одного рівнем охолодження. Перетворювач модифікації 1111H має одноступінчатий елемент Пелтьє, який забезпечує рівень повітряного охолодження 45 °С, перетворювачі D-2 і SIM-12H мають двоступеневу напівпровідникову батарею охолодження, яка забезпечує рівень повітряного охолодження 65 °С, у перетворювачі 1311DR реалізовано чотириступінчасте охолодження і в модифікації 1311XR пятиступінчасте охолодження дзеркала. Перетворювач D-2 має додаткове оглядове вікно для спостереження за дзеркалом під час роботи. У перетворювачі SIM-12H визначення моменту випадання конденсату здійснюється за допомогою інфрачервоної оптики, відтворюваність ± 0,05°С, гістерезис – відсутній.

Вимірювальні блоки перетворювачів мають вбудовану техніку, призначену для формування вихідних сигналів. Зовнішній вигляд перетворювача SIM-12H DewPro (General Eastern Instruments) показаний на рис.10.15, в.

Таблиця 10.19

Характеристики конденсаційних перетворювачів вологості DewPro

Тип	Д-зон вимірювань температури точки росы, °С	Гранична абсолютна похибка, °С	Вихідний сигнал, мА	Макс. робочий тиск, кгс/см^2	Габаритні разміри (довжина ширина), мм	Маса, кг	Напруга жив-лення, В	Д-зон темп. навколишнього повітря, °С	Відно-сна воло-гість, %	Строк служби, років
1111H	-15 ... +25	± 0,2	опір PRT	15	89x30	0,5		-15…+80	80	6
1311DR	-65 ... +25	± 0,2	опір PRT	22	414x223	16	115/230	0…+35	80	6
1311XR	-80 ... +15	± 0,2	опір PRT	8	483x308,5	26	115/230	0…+35	80	6
D-2	-35 ... +25	± 0,2	опір PRT	11	102x114	1,8		-25…+85	80	6
SIM-12H	-10 ... +75	± 0,2	опір PRT	4,5	219x102	1,8		-25…+85	80	6

Сорбційні гігрометри

Суть сорбційних методів полягає у використанні властивості гігроскопічних речовин поглинати вологу із газового середовища. Кількість води, що поглинається сорбентом, однозначно пов’язана із вологістю газового середовища, яка визначається за масою, кольором, кількістю виділеної теплоти, зміною електропровідності або іншими параметрами сорбента при поглинанні вологи сорбентом.

Кулонометричні перетворювачі вологості

Дія кулонометричних (електролізних) перетворювачів вологості ґрунтується на безперервному поглинанні вологи плівкою гігроскопічної речовини та одночасному її електролітичному розкладанні. В якості сорбційного покриття зазвичай використовують фосфорний ангідрид P_2O_5, що має дуже високу гігроскопічність, великий питомий опір в сухому вигляді та хорошу електропровідність після сорбції вологи. В такому датчику безперервно відбуваються два процеси: поглинання вологи фосфорним ангідридом з утворенням фосфорної кислоти $2P_2O_5 + H_2O \rightarrow H_2PO_3$ і електроліз, що супроводжується регенерацією фосфорного ангідриду.

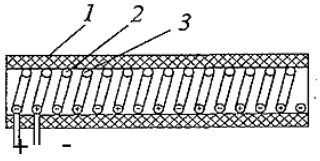


Рис.10.16. Схема кулонометричного вологоміра:

1 - ізоляційна трубка **,** всередині якої розташовані 2, 3 - платинові електроди , підімкнені до джерела постійного струму

Конструкція перетворювача, рис.10.16, являє собою платинові електроди, розташовані на внутрішній або зовнішній поверхні підкладки. Між електродами наноситься шар сорбенту. В якості сорбційного покриття

датчика, окрім п'ятиокису фосфору, використовується КОН, NaOH, метафосфат калію та кремнієва кислота. Для підвищення стабільності електродів застосовують родієве покриття.

Для вимірювання вологості повітря при нормальному та зниженому тиску рекомендується датчик на корундовій підкладці (96,6% - $A1_2O_3$, 0,4% - SiO_2). Гребінчасті родієві електроди наносять методом вакуумного напилення: товщина електродів 0,1 мкм, ширина та відстань між сусідніми зубцями електродів 50 мкм, напруга на електродах - 30 В. Розміри перетворювача 9х11х0,25 мм. Перетворювач характеризується лінійними залежностями струму від тиску водяної пари.

До найважливіших переваг перетворювачів належать широкі межі вимірювань, можливість роботи в широкому діапазоні температур і тисків, взаємозамінність. Кулонометричний метод є основним в області вимірювання малих значень вологовмісту.

Відомі кулонометричні гігрометри Байкал-МК, Байкал-RG, Байкал-5Ц, призначені для вимірювання об'ємної частки вологи в повітрі, азоті, вуглекислому газі, водні, інертних газах та їх сумішах. Аналізатор кулонометричний Редан `М` застосовуються для вимірювання вологості трансформаторного масла.

Електролітичні вологоміри

Вимірювання вологості сорбційним (електролітичним*)* вологоміром засноване на тому, що тиск пари над насиченим розчином солей (наприклад хлориду літію) нижчий, ніж тиск пари над чистою водою при тій же температурі. Тому, для встановлення тиску насиченої пари $p_н$ воду потрібно охолоджувати (вода, точка роси T_d), а розчин хлориду літію нагрівати (LiCl, точка роси T_e) до рівноважної температури T_e: $T_e > T_d$. Враховуючи, що електропровідність кристалічної солі нижча від електропровідності розчину цієї солі в $10^3 \div 10^4$ разів, то нагрівання розчину не викликає труднощів. Таким чином, принцип дії сорбційного електролітичного гігрометра полягає в нагріванні насиченого сольового розчину до температури, при якій встановиться тиск пари, рівний тиску пари в навколишньому повітрі. Знаючи цю температуру, можна визначити тиск пари і отже, температуру точки роси.

Перевагою сорбційного гігрометра у порівнянні з конденсаційним є те, що рівноважну температуру отримують при нагріванні датчика, а не при його охолодженні. Відтворюваність датчика на основі хлориду літію може бути не меншою ±0,2 °С при стабільних умовах. Точність гігрометра залежить від точності вбудованого датчика температур, конструкції і режиму використання гігрометра. Як правило, сумарна похибка вимірювань не перевищує ±1 °С при швидкостях повітряного потоку <0,5 м/с.

Сорбційний перетворювач **ДВ-1К** складається з підігрівного хлористо-літієвого датчика вологості ДВ-1, який вимірює «рівноважну» температуру (абсолютну вологість) та датчика температури ДТ-1, який вимірює температуру оточуючого середовища. Технічні характеристики перетворювача наведені у табл.10.20.

Таблиця 10.20

Технічні характеристики перетворювача ДВ-1К

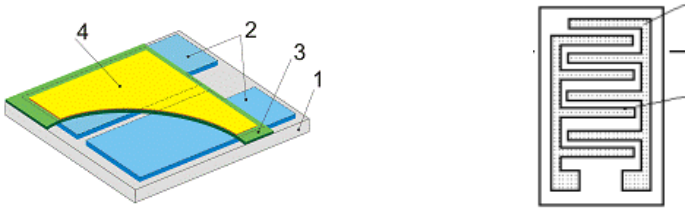
Назва	Значення
Робочий діапазон: відносна вологість, % температура, °С	 від 30 до 98 від +5 до+50
Параметри оточуючого середовища: барометричний тиск, мм.рт.ст. швидкість середовища, м/сек	 - 650 +800 від 0.1 до 3
Похибка вимірювань, %	±1.5
Напруга живлення, ~ В	від 20.4 до 26.4
Максимальна потужність підігрівача, Вт	5
Опір темометрів датчика, Ом	100 (при температурі 0°С)
Час встановлення робочого режиму, хв	не більше 40 після змочування розчином LiCl
Термін дії датчика, міс	не менше 3 з одним циклом змочування

Імпедансні перетворювачі

В наш час для визначення вмісту вологості у повітрі (газах) і різних середовищах широко використовуються **сорбційно-імпедансні перетворювачі**, які діють на основі залежності повного опору (імпедансу) вологочутливого шару сорбенту від кількості адсорбованої вологи. Використовується явище адсорбції вологи зовнішньою **поверхнею** тонкого шару матеріалу (тонкоплівкові ПП) або явище абсорбції вологи **тонким шаром** чи певним **об'ємом** капілярно-пористого матеріалу (товстоплівкові ПП). В якості сорбентів спочатку використовували гігроскопічні іоноутворюючі солі (хлористий літій, хлористий кальцій, фтористий берилій і т.п.). Загальний недолік датчиків з такими сорбентами - низька стабільність, особливо при підвищеній вологості, мала чутливість при низьких рівнях вологості і високий гістерезис. Більш поширеними є імпедансні датчики з органічними полімерними, неорганічними сорбентами на основі оксидів металів і змішаними сорбентами (акрилати, полімери метакрилату, поліакрилу міді, продукти полімеризації хлорвмісних полімерів, кремнійорганічні полімери, які містять аміногрупи).

Існує два основних варіанти конструкції датчиків: з планарним розташуванням електродів, зазвичай гребінчастої форми, і «сендвіч»-

структура, рис.10.17. Датчик, який має «сендвіч»- структуру, виготовляється на підкладках з ситалу або полікору. Для електродів використовується нікель з шаром ванадію, в якості чутливого гідрофільного шару - полімерні наноструктуровані плівки. На шарі діелектричної плівки формується наноразмірна вологопроникна плівка золота, яка виконує роль другого електроду. Постійна часу датчика відносної вологості складає 1-2 с, величина гістерезису - до 2%.



а б

Рис.10.17. Перетворювачі вологості типу «сендвіч» (а) та з гребінцеподібними електродами (б):
1 - підкладка; 2 - електрод; 3 - плівка сорбенту; 4- електрод.

Імпедансні гігрометри можна розділити на три групи: резистивні; ємнісні на основі полімерних діелектриків; ємнісні на основі діелектричного оксиду алюмінію. У **резистивних** перетворювачах використовується залежність між відносною вологістю і електричним опором гігроскопічного середовища (ізотерма сорбції). Інтервал зміни опору може охоплювати від менше 1 до 80 МОм. Головна перевага резистивних датчиків полягає в їх відмінній взаємозамінюваності (зазвичай вона складає ±2% відносної вологості), що дозволяє використовувати резистори для калібрування, і невисока вартість.

Таблиця 10.21

Резистивні і ємнісні перетворювачі компанії Sencera

Тип датчика	**H200M і H300M** 	**H500M** 	**H600M** 	**808H5V5** 	**SENS 818** 
Тип вологочутливого елемента	Резистивний	Ємнісний	Ємнісний	Ємнісний	Ємнісний
Тип ЧЕ температури	Терморезистор 50 кОм	Терморезистор 50 кОм	Терморезистор 50 кОм		
Діапазон вимірюваної вологості, %	10 - 95	0 - 100	0 - 100	0 - 100	0 - 100
Основна похибка,%	± 5	± 4	± 4	± 4	± 1
Напруга живлення, В	5 ± 5%	5 ± 2%	5 ± 2%	5 ± 5%	12 DC
Діапазон вихідної напруги, В	0 ~ 3.0	0.38 ~ 0.68	0.38 ~ 0.68	0.8 ~ 3.9	
Струм споживання,мА	< 5	<1.5	< 1.5	< 1.2	
Робочий температурний діапазон, °С	0 ... +60	0 ... +50	-20 ... +70	-40 ... +85	-40...60
Розмір, мм	34 x 22 x 13	34,5 x 22 x 12	34,5 x 22 x 12	12.5 x 8 x 5	7,6 x 3,6 x 10,2

Насправді опір гігрометра залежить одночасно і від вологості і температури. Тому для підвищення точності вимірювань потрібен одночасний контроль за вологістю й температурою середовища. Характеристики резистивних перетворювачів компанії Sencera наведені у табл.10.21.

Перетворювачі з **вугільним** вологочутливим елементом виконані з дрібно розмеленого вугілля або газової сажі з гігроскопічною зв'язувальною речовиною (гідроксилетилцеллюлоза, ацетилцелюлоза та ін.), нанесених на основу з оргскла або полістиролу. Протилежні грані основи покривають металом, наприклад, сріблом, і вони виконують роль електродів.

Насправді опір гігрометра залежить одночасно і від вологості і температури. Тому для підвищення точності вимірювань потрібен одночасний контроль за вологістю й температурою середовища. Характеристики резистивних перетворювачів компанії Sencera наведені у табл.10.21.

Перетворювачі з **вугільним** вологочутливим елементом виконані з дрібно розмеленого вугілля або газової сажі з гігроскопічною зв'язувальною речовиною (гідроксилетилцеллюлоза, ацетилцелюлоза та ін.), нанесених на основу з оргскла або полістиролу. Протилежні грані основи покривають металом, наприклад, сріблом, і вони виконують роль електродів.

Вихідним параметром вугільного датчика є його електричний опір. При підвищенні вологості опір датчика збільшується. Також за постійної вологості спостерігається і нелінійне збільшення опору датчика при підвищенні температури. Стала часу вугільних датчиків невелика: 2 – 6 с. Істотна перевага – здатність відновлювати свої характеристики після перебування у атмосфері зі 100 %-ною відносною вологістю. Недоліками вугільних датчиків вологості є великий гістерезис (до10%), залежність показів від температури, недостатня стабільність характеристик.

Гігрометри з **керамічними** перетворювачами засновані на залежності електричного опору пористої кераміки одного або декількох оксидів металів від вмісту вологи навколишнього середовища. Рідше в керамічних датчиках використовується залежність ємності від вологості. Керамічні датчики бувають двох типів: з іонною й електронною провідністю. В іонних датчиках зменшення повного опору при збільшенні вологості обумовлено фізичною адсорбцією на поверхні і конденсацією в мікрокапілярах молекул води. У датчиках з електронною провідністю адсорбовані молекули води діють як донорні центри, віддають кераміці електрони. Керамічні датчики належать до товстоплівкових, оскільки товщина влагочутливого шару більше 10 мкм. Використовуються кераміки з CoO, Fe_2O_3. Опір таких датчиків при збільшенні вологості від 30 до 100 % зменшується на 6 порядків. Основним недоліком датчиків є дуже високий опір при вологості нижче 30 % ($R \approx 108 – 1010$ Ом). Знизити опір і підвищити чутливість датчиків дозволяє використання багатокомпонентної кераміки. Японські фірми запропонували понад 70 складів керамічних композицій оксидів металів для датчиків вологості. Датчики мають високу чутливість і стабільність, низький опір (10^5

– 10^6 Ом) при нульовій вологості. Основний недолік керамічних датчиків - складність вимірювання низьких рівнів вологості (менше 1 %). Загальний недолік всіх датчиків вологості резистивного типу – експоненціальна залежність опору від вологості, що вимагає складних вимірювальних схем.

Ємнісні гігрометри у найпростішому випадку це просто звичайні конденсатори з повітряним проміжком. Діелектрична проникність повітря залежить від вологості, і її зміна приведе до зміни ємності. Повітряний проміжок може бути замінений діелектриком, діелектрична проникність якого сильно змінюється під дією вологості. Ємнісні перетворювачі мають практично лінійну характеристику перетворення "вологість-ємність" і є точнішими, ніж резистивні. Вони характеризуються низьким температурним коефіцієнтом, можливістю роботи при високих температурах (до 200ºС), та помірною стійкістю до хімічних випаровувань. Завдяки повному діапазону вимірювань, високій точності й температурній стабільності, ємнісні датчики стали найбільш поширеними, як для вимірювання вологості навколишнього повітря, так і в автоматизованих виробничих процесах.



Рис.10.18. Ємнісні перетворювачі вологості АО «Тера»

АО «Тера» випускає 6 моделей ємнісних перетворюачів вологості ДВ, датчиків вологості і температури ДВТ, в яких на вибір, використовуються три типи ємнісних чутливих елементів: HIH, SHT21 і SHT25, табл.10.22. Моделі -01, -02, -08, -09 - занурювальні; -10 - настінні; -06 - переносні. Датчики HIH поставляються з вбудованими перетворювачами 4-20 мА, датчики SHT - з перетворювачами 4-20 мА, 0-10 В, RS485 і з 2-х провідниковим послідовним інтерфейсом I2C. Датчики SHT з виходом Rs485 і I2C мають вбудований термісторний датчик температури. Зовнішній вигляд перетворювачів вологості АО «Тера» показаний на рис.10.18.

Таблиця 10.22

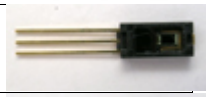
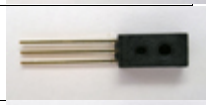
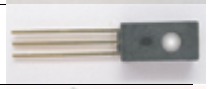
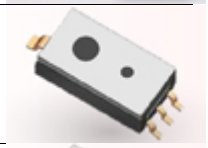
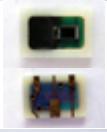
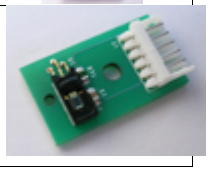
Характеристика типів ємнісних перетворювачів вологості АО «Тера»

Тип НСХ	Робочий діапазон, RH%	Клас точності в діапазонах	Температура експлуатації,°С
HIH	0... 100	0...10% - 6; 10...89% - 3; 89...93% - 4;93...100% -8	0...60
SHT21	0... 100	0...10% - 6; 10...90% - 3; 90...100% - 6	-20...60
SHT25	0... 100	0...10% - 4; 10...90% - 2; 90...100% - 4	-20...60

Ємнісні ПП вологості Honeywell призначені для вимірювання відносної вологості повітря від 0 до 100%. Вони мають багатошаровий чутливий елемент у вигляді двох плоских платинових пластин, простір між якими заповнений діелектричним термореактивним полімером. Інтенсивний полімер забезпечує широкий діапазон робочих температур, високу хімічну стійкість до агресивних рідин та їх парів.

Таблиця 10.23

Характеристики ємнісних перетворювачів вологості Honeywell

Назва	**Діапазон RH, %**	**Пос-тійна часу,**	**$T_{роб}$ °C**	**$U_ж$, В**	**$I_ж$, мкА**	**Вбу-дований тер-мода-тчик**	**Зовнішній вигляд**
HIH-4602-A	0 … 100	50	-40…+85	4,0…5,8	200	100 кОм, NTC	
HIH-4602-C	0 … 100	50	-40…+85	4,0…5,8	200	1 кОм, платин.	
HIH-4000-001	0 … 100	15	-40…+85	4,0…5,8	200	немає	
HIH-4000-003	0 … 100	15	-40…+85	4,0…5,8	200	немає	
HIH-4010-001	0 ... 100	15	-40...+85	4,0...5,8	200	немає	
HIH-4020-002	0 ... 100	15	-40...+85	4,0...5,8	200	немає	
HIH-4021-002	0 ... 100	15	-40...+85	4,0...5,8	200	немає	
HIH-4030-001	0 ... 100	15	-40...+85	4,0...5,8	200	немає	
HIH-4030-003	0 ... 100	15	-40...+85	4,0...5,8	200	немає	
HIH-4031-001	0 ... 100	15	-40...+85	4,0...5,8	200	немає	
HIH-4031-003	0 ... 100	15	-40...+85	4,0...5,8	200	немає	
HIH-4100-001	0 ... 100	15	-40...+85	4,0...5,8	200	немає	
HIH-4101-001	0 ... 100	15	-40...+85	4,0...5,8	200	немає	

Перетворювач являє собою інтегрований прилад, який містить також схему обробки, що забезпечує перетворення, підсилення і лінеаризацію сигналу. Вихідний сигнал датчиків 1,0...4,0 В, що забезпечує пряме підключення до АЦП мікроконтролера. Характеристики ємнісних

перетворювачів компанії Sencera наведені у табл.10.21, Honeywell – у табл.10.23.

Перетворювач вологості повітря DHT австрійського виробника E+E Electronik складається з ємнісного датчика вологості, термістора і АЦП Сенсор створений на основі тонкоплівкових технологій. Перевага - висока точність, відтворюваність даних, стійкість до негативного впливу навколишнього середовища.

Дія **тонкоплівкових напівпровідникових** перетворювачів ґрунтується на зміні провідності тонкого шару напівпровідника під дією зарядів, індукованих на його поверхні при адсорбції вологи. Перші датчики цього типу були виконані у вигляді діода Шотки, утвореного переходом Si (або Ge), - двоокис олова. В якості напівпровідника можна також використати окисли цинку, марганцю, міді, нікелю, титану, кадмію, заліза, срібла.

Найбільшого поширення набули тонкоплівкові датчики з вологочутливим шаром оксиду алюмінію. Гігрометр **на основі оксиду алюмінію** має конструкцію з двох електродів, рис.10.19. Перший електрод являє собою алюмінієву пластинку, на яку методом анодного осадження нанесений пористий шар оксиду алюмінію. В якості другого електроду використовується вологопроникний шар металу. Тут можуть бути використані алюміній, мідь, золото, срібло, платина, паладій, ніхром. Зазначений електрод не повинен закривати пористий шар оксиду алюмінію. Шар оксиду алюмінію має пористу структуру, реальна площа адсорбції становить ~0,2 м^2 на 1 см^2 ефективної площі.

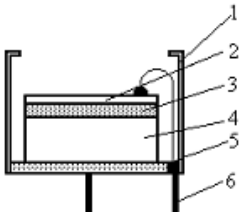


Рис.10.19. Структура перетворювача вологості на основі плівки Al_2O_3:
1 – корпус; 2 – тонка плівка золота; 3 – пориста плівка Al_2O_3 ; 4 – шар Al; 5 – металічна підкладка; 6 – виводи

Імпеданс перетворювача змінюється в залежності від відносної вологості навколишнього середовища. Товщина плівки оксиду визначає чутливість датчика і його швидкодію. При товщині близько декількох мікрометрів діапазон вимірювання вологості – від 20 до 100 %, зменшення товщини на порядок збільшує швидкодію датчика і робить його чутливим до вмісту вологи менше 1 %. При товщині оксидного покриття менше 0,3 мкм зміна імпедансу залежить тільки від парціального тиску водяної пари і не залежить від температури. Це дозволяє вимірювати абсолютну вологість.

Відомі перетворювачі на основі анодованого окисиду алюмінію фірм Panametrics (США) і Shaw (Великобританія). Датчик вологості GE Panametrics TF Probe, табл.10.24, вимірює вміст вологи в газах і неводних рідинах в широкому діапазоні – від слідових кількостей до значень вологості навколишнього середовища. Датчик використовується спільно з

аналізаторами вологості Moisture Image Series . Крім вологовмісту датчики серії TF вимірюють також тиск і температуру. Нелінійний термістор з негативним температурним коефіцієнтом забезпечує можливість вимірювання температури в межах від -30°С до +70°С. Перетворювач тиску, що включає в себе п'ять твердотільних пьезорезистивных чутливих елементів, дозволяє вимірювати тиск до 345 бар.

Таблиця 10.24

Характеристики перетворювача GE Panametrics TF Probe

Датчик вологості	TF Probe на основі оксиду алюмінію 
Температура точки роси/інею,°С	Повний можливий діапазон калібрування: від – 110 до 60
Діапазон вимірювання імпедансу	Від 50 кОм до 2 МОм при 77 Гц, залежно від тиску насиченої пари
Похибка,°С:	± 2 в межах від – 65° до 60°С.
	± 3 в межах від –110° до –66°С.
Відтворюваність,°С	± 0,5 в межах від –65° до +60°С.
	± 1,0 в межах від –110° до –66°С.
Робоча температура,°С	Від –110 до 70
Робочий тиск	Від 5 мкм рт. ст. до 345 бар
Постійна часу, с	Менше 5-ти при 63% стрибкоподібній зміні вологості в обох напрямках (зволоження і осушення)
Вбудований датчик температури	Нелінійний термістор з негативним температурним коефіцієнтом
Робочий діапазон, °С	Від -30 до +70
Похибка, °С	±0.5 гранична
Постійна часу, с	10 у нерухомому повітрі при 63% стрибкоподібній зміні температури в обох напрямках.
Вбудований датчик тиску	Твердотільний/п’єзорезисторний
Діапазони вимірювання, бар	Від 3 до 345 в межах: 3 – 21 бар; 4 – 35 бар; 7 – 69 бар;
	21 – 207 бар; 35 – 345 бар
Похибка, %	±0.1 від діапазону вимірювання

В вимірювальних перетворювачах вологості DewPro фірми "General Eastern Instruments" модифікацій MMY30, MMY31, MMY35, MMY245 використовується ємнісний тонкоплівковий оксидно-алюмінієвий сенсор, модифікацій MMR30 – силиконовый полімерний сенсор. Перетворювачі вологості є вимірювачами температури точки роси або ppmv і використовуються для вимірювання вологості в системах осушення повітря підприємств, при тиску в газопроводі або при атмосферному тиску. Прилади

мають вбудований мікропроцесорний контролер, який забезпечує загальне управління приладом та представляє результати вимірювань вологості в одиницях температури точки роси, °С, або у одиницях абсолютної вологості (ppm). Характеристики перетворювачів наведені у табл.10.25.

Таблиця 10.25

Характеристики перетворювачів вологості DewPro

Тип	Д-зон вимірювань температури точки росы, °С	Гранична абсолю-тна похибка, °С	Вихідний сигнал, мА	Д-зон вимірювань температури, °С	Макс. робочий тиск, кгс/см^2	Габаритні разміри, мм	Маса, кг	Напруга жив-лення, В	Д-зон темп. навколиш-нього повітря, °С	Відно-сна воло-тість, %
MMY31	-90…+20	± 2	4-20		120	264,2x112.8	1,5	24	0…+60	50
MMY35	-90…+10	± 2	4-20		10	144x30	0,25	24	-40…+50	50
MMY245	-100…+20	± 2			10		3,2	6	0…+60	80
MMR30	-15…+85	± 1	4-20	-20…+40	17	168,1x112.8	2	24	0…+60	80

П'єзосорбційні гігрометри

Принцип роботи п'єзосорбційних перетворювачів вологи заснований на зміні амплітуди та частоти коливань п’єзоелемента (кварцевого резонатора) при адсорбції вологи його поверхнею або гігроскопічною плівкою, нанесеною на його поверхню. У результаті процесів сорбції або десорбції водяної пари збільшується або зменшується маса гігроскопічного покриття і, як наслідок, змінюється частота коливань п'єзосорбційного елемента. В усталеному режимі частота коливань є мірою вологості навколишнього середовища.

Більш поширеними є перетворювачі з плівкою, яка наноситься на металізовану поверхню кварцу. Такий перетворювач є поєднанням сорбційного вологочутливого елементу з п’єзокварцевим перетворювачем, який вимірює сорбовану масу вологи. Так досягають високої чутливості (визначення зміни маси на рівні 10^{-11}), зниження нижньої межі вимірювань.

Крім того, до їх переваг методу слід віднести можливість визначення вологості в широкому діапазоні, швидкодію, легкість перетворення частотного виходу в цифрову форму. При використанні високоефективних сорбентів, таких, як цеоліти, силікагель, сульфований полістирол, п'єзосорбційний метод може бути застосований для вимірювання мікроконцентрацій вологи в газах.

Провідні позиції в розробці, виготовленні й реалізації датчиків вологості п'єзосорбційного типу належить фірмі DuPont (США). Поріг чутливості п'єзосорбційного аналізатора вологості однієї з останніх моделей складає 0,02 ppm, повний діапазон вимірювання вологості від 0 до 20 000 ppm.

Порівняльні характеристики датчиків вологості різних типів наведені у табл.10.26.

Таблиця 10.26

Порівняльні характеристики перетворювачів вологості

Активний матеріал	термореактивний полімер	термореактивний пластик	однорідний термо пластик	однорідний триокис алюмінію	хлорид літієва плівка	Психрометр
Підкладка	керамічна або кремнієва	полістирол або майлар	ні	ні	керамічна	ні
Параметр, що змінюється	ємність	ємність	опір	опір	провідність	температура
Д-н вимірювання, % RH	0…100	0…100	20…100	2…90	15…< 100	20…100
Точність, %	±1,0…±5,0	±3,0…±5,0	±3,0…±10,0	±1,0…±5,0	±1,0…±5,0	±3,0…±4,0
Взаємозамінюваність, %RH	±2,0…±10,0	±2,0…±20,0	±5,0…±25,0	погана	±30…±1 0,0	відмінна
Гістерезис, %	< 1,0…3,0	2,0…5,0	3,0…6,0	< 2	дуже високий	високий
Лінійність,%	±1,0	±2,0	погана	погана	дуже погана	погана
Час відгуку	15…60 с	15…90 с	2…5 хв	3…5 хв	2…5 хв	2…5 хв
Д-н робочих температур, °С	40…185	25…100	10…40	10…75	-	0…100

Характеристики перетворювачів вологості провідних виробників, таких як APAR SENSIRION, SYHITECH, TDK та ін. наведені у табл. 10.27.

Таблиця 10.27

Характеристики перетворювачів вологості

Назва (тип)	Виробник	Рівень вологи, % RH	Рабоча температура, °С	Похибка, % RH	Постій-на часу, с	Напруга живлення, В	Вихід	Тип корпусу
AR250	APAR	0 ~ 100	-10 ~ 60	±3	10	12DC	NONE	58 x 64 x 35мм
SHT10	SENSIRION	0 ~ 100	-40 ~ 125	±0,5	8	2.3 ~ 5.5	NONE	SMD4
SHT71	SENSIRION	0 ~ 100	-40 ~ 125	±0,5	8	2.3 ~ 5.5	NONE	SIL4
SY-HS-220	SYHITECH	30 ~ 90	0 ~ 60	±5	NONE	5DC	NONE	30 x 43 x 10мм
SY-HS-230	SYHITECH	10 ~ 90	0 ~ 60	±5	NONE	5DC	NONE	18 x 25 x 9мм
CHS-GSS	TDK	20 ~ 85	0 ~ 50	±5	60	4.75 ~ 5.25	Linear Voltage	NONE
CHS-UGS	TDK	5 ~ 95	0 ~ 50	±5	60	4.75 ~ 5.25	Linear Voltage	NONE
CHS-UPS	TDK	5 ~ 95	0 ~ 50	±3	60	4.75 ~ 5.25	Linear Voltage	NONE
HUMIDITY-SENS-E	Vishay	10 ~ 90	0 ~ 85	NONE	5	15	Capacitance	SIP
HS1101LF	Measurement Specialties Inc.	1 ~ 99	-40 ~ 140	±2	3	10	Capacitance	SIP
HM1520-LF	Measurement Specialties Inc.	0 ~ 100	-40 ~ 60	±5	10	4.75 ~ 5.25	NONE	NONE
27920	Parallax Inc.	1 ~ 99	-40 ~ 100	±5	5	5 ~ 10	Capacitance	SIP

10.3.2. Перетворювачі вологості грунту

Одним із основних природних засобів виробництва продовольства э ґрунт (земля), а одними з головних фізичних властивостей ґрунтів, які визначають їх родючість, є вологість і температура. Без наявності необхідної кількості води в ґрунті і відповідної температури с.-г. культури або не забезпечують потрібної врожайності, або не проростають зовсім.

Поточна інформація про вологість і температуру ґрунту в системі управління виробництвом с.-г. продукції необхідна, в першу чергу, для прийняття оперативних рішень з питань основного і передпосівного обробітку ґрунту, доцільності і строків сівби (посадки) с.-г. культур, норм і строків внесення добрив, норм і строків поливу, тощо.

Розробка та застосування автоматизованих вимірювальних систем для збирання, обробки, передачі і збереження інформації про стан ґрунту є однією з найактуальніших технічних задач с.г. виробництва. Найбільш оперативно отримати інформацію про вологість і температуру ґрунту можна за допомогою штучних супутників, але існуючі системи забезпечують отримання інформація тільки щодо поверхні землі або кількох сантиметрів верхнього шару ґрунту.

Подальший розвиток вимірювальних систем безпосередньо пов’язаний зі станом вирішенням проблеми розробки методів вимірювання, у т.ч. дистанційних, та створення новітніх датчиків вологості ґрунту.

Сьогодні для вимірювання вологості ґрунту використовуються прямі, непрямі і дистанційні методи, табл.10.28. До прямих відносяться методи, направлені на безпосереднє визначення вмісту вологи в ґрунті. Це термостатично-ваговий і хімічний методи. Термостатично-ваговий метод визначення вологості ґрунту прийнято вважати еталонним.

Таблиця 10.28

Методи вимірювання вологості ґрунту

Метод вимірювання		Вимірювальний параметр
Група	Принцип	
Прямі	Термо-ваговий	Маса, об’єм
Непрямі	Тензометричний	Тиск в порах
Радіаційні	Нейтронний	Сповільнення нейронів
Електричні	Електрична розвідка	Електричний опір
Електромагнітні	Ємнісний (вологомір)	Діелектрична проникність
	Геофізичний (георадар)	Діелектрична проникність
	Надвисокочастотний	Амплітуда, фаза, поляризація
Оптичні	Фотометричний, інфрачервоний	Довжина хвилі, інтенсивність поглинання

До непрямих відносяться методи, які ґрунтуються на вимірюванні електричних і неелектричних величин, залежних від вологості ґрунту.

Дистанційними вважають методи, які базуються на вимірюванні електромагнітного випромінювання в різних частотних діапазонах (радіотеплового, котокохвильового, гамма випромінювання). Перелік основних методів вимірювання вологості ґрунту наведено у табл.10.28. Розглянемо найбільш поширені з них.

Термостатно-ваговий (термогравіметричний) метод

Вологість матеріалу − це виражене у відсотках (%) значення відношення маси води до маси конкретного матеріалу, а відношення маси вологи, що міститься у вимірюваному речовині, до його маси у вологому стані називається відносною вологістю матеріалу.

Найбільш поширеним методом одержання даних про вологість ґрунту є термостатно-ваговий (ТВ) метод. Цей метод ґрунтується на визначенні маси води та маси сухого ґрунту. Вологість ґрунту визначають шляхом відбору ґрунтових проб з окремих шарів на глибині від 5 до 100-150 см, використовуючи спеціальний ґрунтовий бур. Ці проби вміщують в алюмінієві бюкси об'ємом, приблизно, 60 куб. см і транспортують в лабораторію. Там зразки ґрунту нагрівають до 105 °С до отримання сталої ваги. Процес триває 10...12 год. Вологість ґрунту визначають як відношення маси втраченої води до маси сухого ґрунту.

Вагову вологість ґрунту у відсотках визначають використовуючи співвідношення:

$$W = (m_1 - m_0)/(m_0 - m)x100 ,$$

де: m_0 - маса висушеного ґрунту разом з бюксом, г; m_1 - маса вологого ґрунту разом з бюксом, г; m - маса порожнього бюксу, г;

Метод дозволяє з досить високою точністю визначати вологість окремого зразка ґрунту, тому його часто використовують для градуювання ґрунтових вологомірів. Перевагою методу є простота процесу обчислень, невисока вартість обладнання.

До недоліків слід віднести потребу у багатьох зразках при дослідженнях залежності вмісту води в ґрунті від часу та координат, велика тривалість процесу визначення вологості ґрунту (1,5-2 дні), що спричиняє запізнення при прийнятті агротехнологічних рішень, неможливість розповсюдження одержаних даних на все поле, і обумовлює не репрезентативність методу.

Аналізатор вологості електронний ADGS200/IR застосовується в лабораторіях і на виробництві як для визначення кількості вологи, що міститься в досліджуваних речовинах, так і для їх зважування. Складається вологомір з двох частин: лабораторних ваг (3 клас точності) і потужних інфрачервоних ламп, які розташовані над вагами для сушіння зразків. Ваги обчислюють кількість вологи в речовинах до сушіння і після неї за допомогою термогравіметричного методу. Аналізатор має зручне текстове меню, забезпечує виведення графіка визначення вологості на дисплей,

вбудований інтерфейс RS-232, що забезпечує підключення вологоміра до принтера або комп'ютера



Рис.10.20. Аналізатор вологості ADGS200/IR

Зовнішній вигляд аналізатора вологості ADGS200/IR показаний на рис.10.20. Його основні технічні характеристики:

клас точності - 3;

найбільша границя зважування - 200 г;

найменша границя зважування - 0,02 г;

дискретність (d) - 0,001 г;

умови завершення визначення вологості - за часом / авоматично / вручну;

максимальна температура сушіння - 160°С;

кількість режимів роботи - 6;

графічний індикатор з під світкою;

габаритні розміри - 235х345х200 мм.

Нейтронний метод

Метод заснований на здатності атомів водню уповільнювати рух швидких нейтронів. Ґрунтова вода, як відомо, складається з двох атомів водню і одного атому кисню. Атоми водню, що містяться в ґрунтовій воді, уповільнюють рух швидких нейтронів переводячи їх у ранг повільних нейтронів. Для вимірювання вологи застосовується металевий зонд діаметром близько 40 мм, який містить джерело швидких нейтронів і детектор повільних нейтронів. Зонд занурюють у ґрунт і швидкі нейтрони внаслідок пружних зіткнень з атомами в ґрунті втрачають свою кінетичну енергію. При цьому, рівень послаблення швидких нейтронів є пропорційним кількості атомів водню, істотним джерелом яких є ґрунтова вода.. Повільні нейтрони оточують зонд і потрапляють на детектор. Сигнал з виходу детектора через кабель подається на систему реєстрації.

Переваги методу - можливість оцінки кількості води в великих ґрунтових об’ємах, можливість оцінки об’ємної вологості ґрунту, швидкість

вимірюваннь, здатність вимірювати вологість ґрунту протягом тривалого періоду часу.

Недоліками є необхідність роботи з радіоактивними джерелами, потреба у калібруванні приладу, висока вартість обладнання, неточність вимірювань поблизу ґрунтової поверхні.

Метод використовується у нейтронному **вологомірі ВНП-1.** В складі приладу - електронний цифровий вимірювальний блок з індикатором на рідких кристалах і датчик, рис.10.21, розташований в одному корпусі разом із джерелом швидких нейтронів. При вимірюваннях вологості датчик приладу занурюється в ґрунт і проводиться визначення енергії нейтронів, уповільненених атомами водню. На базі отриманих даних визначається вміст води в ґрунті.

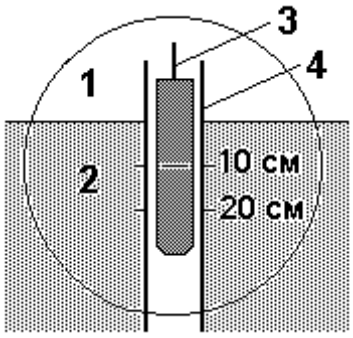


Рис. 10.21. Датчик ВНП-1 на глибині 10 см:
1- повітря, 2 - ґрунт, 3 - датчик-зонд приладу ВНП-1, 4 - обсадна труба

Похибки вимірювання вологості ґрунту обумовлені тим, що атоми водню входять не тільки до складу води, але й до складу органічної частини ґрунту (гумусу, перегнилих і не перегнилих решток рослин, органічних добрив та мікрофлори), яка може досягати 20 відсотків від всієї маси ґрунту. На результати вимірювання також впливають щільність, температура, механічний і хімічний складу ґрунту.

Крім того, на глибинах до 20 см сфера дії вологоміра включає не тільки ґрунт, але й повітря, а концентрація атомів водню в одиниці об'єму повітря значно нижча, ніж у ґрунті (див. рис.10.21). Ще одним недоліком приладу є потреба закладання на полях обсадних труб для розташування датчиків, що створює певні незручності для господарників.

Електричні методи вимірювання вологості

Електричні методи вимірювання вологості ґрунтуються на залежності електропровідності, досліджуваних матеріалів (ґрунту) від вмісту в них вологи. Серед відомих нині методів найпоширенішим є кондуктометричний метод.

Кондуктометричний метод

За цим методом вологовміст оцінюється за результатами вимірювання електричного опору або провідності вологого матеріалу при постійному

струмі або струмі промислової частоти. Як правило, кондуктометричний метод застосовується для визначення вологості від 2 % до 30 %. У діапазоні 0–2% його використання обмежене проблемами вимірювання з достатньою точністю опорів (близько 1011–1012 Ом); При вологовмісті більшому за 30 %, метод забезпечує невисоку чутливість через степеневу залежність опору від вологості.

На результати вимірювання істотно впливають змінний хімічний та сольовий склад досліджуваного матеріалу, температура, тиск, розподіл вологи, розмір та форма зерен, наявність домішок тощо. Окрім того, під час вимірювань на постійному струмі спостерігається поляризація електродів, яка залежить від хімічного складу зразка. Зі збільшенням вологовмісту вплив поляризації зростає. Для зменшення впливу поляризації використовують вимірювання при змінному струмі з частотою до 2–3 кГц.

Для вимірювання вологості використовується також вимірювання електричного опору чи електропровідності матеріалу на високих і низьких частотах. Встановивши залежність електричного опору чи електропровідності від вологості, наприклад, за ТВ-методом, можна вивести формулу для визначення вологості будь-якого матеріалу. Однак пряме застосування таких вимірювань для ґрунту неможливе, оскільки на результати вимірювань електричного опору чи електропровідності на будь-якій частоті впливають, практично, однаково одні і ті ж параметри ґрунту: вологість, температура, щільність, хімічний і механічний склад. Крім того, різниця між результатами вимірювань на будь-яких двох частотах у межах від 100 Гц до 2 Мгц є незначною.

Найбільшою перевагою кондуктометричного методу є простота схеми та конструкції вимірювального приладу, що обумовлює їх невисоку вартість. До переваг таких пристроїв можна також віднести широкий діапазон, високу точність і оперативність вимірювань.

До недоліків, які обмежують його застосування, можна віднести складну підготовка проб вимірюваного матеріалу, початок діапазону вимірювання від 5% і глибину вимірювання до 30 мм.

Вимірювач параметрів ґрунтів ВПҐ-1 (ИПП-1) відноситься до електричних вологомірів, в якому використано принцип вимірювання комплексної електропровідності при змінному струмі низької частоти (до 10 кГц). В комплект приладу входять вимірювальний блок на базі мікроамперметра, датчик-свердло і з’єднувальний шнур між ними. Датчик виконаний у формі двох металевих електродів, виготовлених у формі двох напівгвинтів і скріплених між собою через ізолятор, рис.10.22. Основні його технічні дані такі: діапазон вимірювання вологості ґрунту 2 - 40 % від сухої маси ґрунту; діапазон вимірювання температури ґрунту - 0…+ 50°С; Середньоквадратичне відхилення від даних ТВ-методу 2, 5 %.



Рис.10.22. Чутливий до вологості і температури елемент датчика ВПҐ-1

Для вимірювань вологості ґрунту була розроблена спеціальна методика градуювання на даному ґрунті і визначення градуювальник коефіцієнтів. Також передбачена компенсація температурної похибки шляхом введення поправок на температуру, виміряну тим же ВПҐ-1 на тій же глибині.

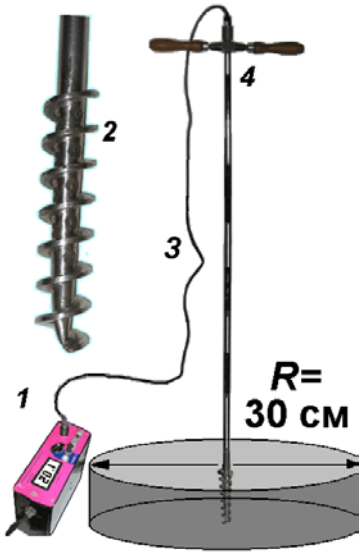


Рис.10.23. Зовнішній вигляд вимірювача параметрів ґрунтів ВПҐ-4ц:
1 - цифровий вимірювальний блок; 2 - наконечник датчика у збільшеному вигляді; 3 - з`єднувальний провід; 4 - датчик вологості ґрунту.

В Українському науково-дослідному гідрометеорологічному інституті в 2001-2002 рр. створено **вимірювач вологості і температури ґрунту ВПҐ-4ц**, рис.10.23. Для вимірюванні вологості ґрунту застосовано спосіб вимірювання комплексної електропровідності ґрунту, який є більш чутливим до ємнісної складової комплексної електропровідності ґрунту залежно від його вологості. Характеристики вимірювача наведені у табл.10.29.

Перетворювач вологості ґрунту DT171A використовується для управління процесом зрошення. Датчик складається з двох концентричних електродів, вставлених у еталонний гранульований матричний (в’язкий) матеріал. В'язкий матеріал оточений захисною синтетичною мембраною і розташований у корпусі з нержавіючої сталі, рис.10.24. Пристрій щільно занурюється у ґрунт і встановлює рівновагу з вологістю ґрунту.

Таблиця 10.29

Характеристики вимірювача вологості і температури ґрунту ВПҐ-4ц

Діапазон вимірювання параметрів ґрунту:	
температури Т, °С	-15 … +35
вологості ґрунту W(%)	2 … 40
загальних запасів вологи в 10 см шарі (мм)	3 … 60
Середньоквадратична похибка вимірювання:	
температури	± 1,0°С (2,5 %)
вологості ґрунту W(%)	± 1,5
загальних запасів вологи в 10 см шарі (мм)	±3

Перетворювач вимірює електричний опір вологого ґрунту, який зменшується із збільшенням вологості ґрунту, і перетворює його у відкалібровані показання всмоктуючого тиску ґрунту. Він вимірює діапазон значень вологості ґрунту від 0 до 200 сантібар (cbar) з точністю ± 2% . Роздільна здатність складає 0,05 cbar. Діапазон робочих температур 0-40 °С. Наведена нижче табл.10.30 представляє стандартну інтерпретацію показань вологості ґрунту у сантібарах.



Рис.10.24. Датчик вологості ґрунту DT171A:
а - датчик вологості WATERMARK; б - адаптер Fourier; в - BNC-конектор

Датчик може застосовуватись з реєстраторами даних Nova 5000, MultiLogPRO або TriLink та програмним забезпеченням MultiLab.

Таблиця 10.30

Вологість (cbar) і стан ґрунту

Вологість ґрунту (cbar)	Стан ґрунту
0-10	Насичений ґрунт. Знаходиться в такому стані 1-2 дні після зрошення.
10-20	Ґрунт є достатньо вологим (окрім грубозернистих пісків, які висихають при такому діапазоні значень).
30-60	Звичайний діапазон значень для зрошення або поливу (окрім ґрунтів з щільної глини). Зрошення проводять при верхніх показниках цього діапазону у холодному вологому кліматі та з ґрунтами, що мають високу вологоутримуючу здатність.
60-100	Звичайний діапазон значень для зрошення ґрунтів з щільної глини.
100-200	Ґрунт стає небезпечно сухим для максимального виробництва. Будьте обережні.

Неелектричні методи вимірювання вологості

З неелектричних методів найчастіше використовують тензометричний, як найбільш простий, доступний і достовірний. Він ґрунтується на залежності всмоктуючої сили ґрунту від його вологості. Всмоктуюча сила ненасиченого вологою ґрунту залежить від вологості ґрунту. Вимірюють цю силу первинними перетворювачами тиску, наприклад, пористим керамічним фільтром, наповненим водою і герметичним зверху, який розміщується у ґрунті. При висиханні ґрунту його вологість зменшується а тиск зростає. Діапазон розрідження складає від 0 до 9 м водяного стовпа (-100 аПа). При більших розрідженнях керамічний фільтр стає повітряпроникним. Для вимірювання розрідження використовують також електронні первинні перетворювачі тиску. При відповідному градуюванні за всмоктуючим тиском визначають вологовміст ґрунту.

Загальний вигляд **тензометричного вологоміра** показаний на рис.10.25. Він складається з керамічного фільтру 1, водної камери 2, електронного датчика тиску 3, блоку обробки та індикації результатів 4. Аналоговий сигнал датчика тиску 3 за допомогою аналогово-цифрового перетворювача перетворюється у цифрову форму і обробляється мікроконтролером блоку 4. Після обробки за відповідним алгоритмом результати вимірювання вологості відображаються на індикаторі.

Перетворювач вологості ґрунту корпорації Sutron (США) являє собою датчик електричного опору, призначений для контролю вологості ґрунту (рис.10.26). Конструктивно він являє собою циліндр, в якому основна стінка є напівпроникною (пропускає тільки воду), а в середині (циліндра) знаходяться два ізольовані електричні контакти і речовина, яка всмоктує вологу з ґрунту. Коли внутрішня всмоктувальна сила датчика більша ніж

сила у ґрунті він усмоктує воду, і датчик віддає воду, коли, навпаки, всмоктувальна сила ґрунту більша ніж сила датчика.



Рис.10.25. Тензометричний вологомір

Таким чином між осмосом всередині датчика і осмосом ґрунту завжди існує динамічна рівновага. Діапазон осмотичних сил знаходиться в межах від 10 до 200 сантибар, а виміряний електричний опір - в межах від 500 до 30000 Ом.

Недоліками такого типу датчиків є велика інерційність Окрім того датчик - сорбційний (усмоктуючий), і сорбційна здатність його з часом може змінюватись, а з нею і його градуювальні параметри. Внутрішній наповнювач датчика може хімічно взаємодіяти з ґрунтом, а це, в свою чергу, призведе до змін в його електричних градуювальних параметрах.



Рис.10.26. Датчик вологості ґрунту корпорації Sutron (США)

Електромагнітні методи

Електромагнітні методи вимірювання вологості ґрунтуються на різниці значень діелектричної проникності твердої основи, повітря і води. Тому їх ще називають діелькометричними (діелектричними) методами.

Діелькометричний метод визначення вологості передбачає оцінку вологовмісту за результатами вимірювання діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат вологих матеріалів та речовин в широкому діапазоні частот – від звукових до НВЧ.

Діелектрична проникність речовини характеризує поляризацію діелектриків під впливом зовнішнього електричного поля. Вона показує, у скільки разів сила взаємодії між зарядами у вакуумі перевищує силу

взаємодії між тими ж зарядами в даному середовищі. Діелектрична проникність води є майже сталою величиною (близько 80), тоді як діелектрична проникність сухого ґрунту становить 3 – 12. Отже, діелектрична проникність ґрунту є дуже чутливою до об'ємної вологості ґрунту. Наприклад, зміні вмісту води у ґрунті від 20% до 21,8% відповідає зміна діелектричної проникності ґрунту від 3 до 5.

Слід зазначити, що діелектрична проникність та діелектричні втрати залежать на тільки від від вологовмісту, але і від частоти змінного поля, температури, густини тощо.

Порівняно з кондуктометричним діелькометричний метод має такі переваги: меншу чутливість до температури матеріалу, можливість компенсації впливу значних втрат (до tgδ=100), зменшений вплив на результати вимірювання розподілу вологи по об'єму досліджуваної речовини, більшу швидкодію та вищу точність вимірювань.

На практиці вимірювання діелектричної проникності ґрунту здійснюють методами: визначення опору між двома електродами, розміщеними в ґрунті або вимірювання ємності конденсатора, який утворюється вологим ґрунтом між двома обкладинками. Сенсори такого типу компактні, характеризується швидкодією, невисокою вартістю, та можуть бути застосовані в автоматизованих системах вимірювання вологості ґрунту. Недоліками цих методів є необхідність калібрування

Один із таких сенсорів, **FC-28,** який може використовуватись в автоматичних системах керування вологістю ґрунту, показаний на рис.10.27.

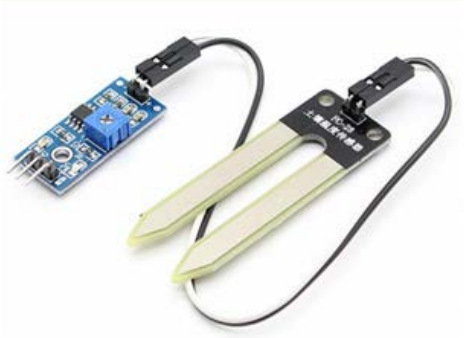


Рис.10.27. Датчик вологості ґрунту FC-28

Він зібраний на мікросхемі LM393, має окремий чутливий елемент, настройку чутливості і працює в комплекті з мікроконтролером Arduino. Напруга живлення 3-5В, струм 35мА. Чутливий елемент датчика FC-28 вставляється в ґрунт. Між двома електродами чутливого елемента створюється невелика різниця напруг. Якщо ґрунт сухий, його опір великий і струм датчика буде малим. Якщо земля волога, її опір менший і струм датчика буде більшим.

Датчик має два виходи: аналоговий і цифровий. За результуючим аналоговим вихідним сигналом можна судити про ступінь вологості ґрунту (для 10-бітного АЦП): 0-300 - сухий ґрунт; 300-700 - вологий ґрунт; >700 - датчик у воді. Цифровий сигнал призначений для автоматичного управління навантаженням. Його можна налаштувати на задану вологість ґрунту

(порогове значення). Поріг вологості виставляється змінним резистором. Якщо вологість ґрунту вища від порогової, то датчик видає сигнал низького рівня (0), якщо нижча від порогової, то високий рівень (1).

Таблиця 10.31.

Технічні характеристики перетворювачів RIXEN

Модель	**MTR-731**	**MTR-732**	**ZD-06**
Діапазон вимірювання	0,0 ~ 100 % шкала Абсолютна вологість 6,0 ~ 56,0 % WME*	Температура: -40 ~ 60°C, 20 ~ 80°C, 0 ~ 100°C Вологість: 0,0 ~ 100 % шкала Абсолютна вологість 6,0~56,0% WME	Діапазон вимірювання вологості ґрунту: : 1-8 (10% - 80% RH Діапазон вимірювання рівня PH: от 3.00 до 8.00 PH
Точність (при 25 °C)	Вологість ±2%	Температура ±0,4 °C Вологість ±2%	Кислотність +/- 0.3pH
Стабільність	Краща ніж 1% на рік		
Температурна компенсація	±0,02% / °C		
Час відгуку	біля 3 секунд		
Вихід Вологість: 0,0 ~100 % Температура: -40 ~ 60 °C	Вихід 4 ~ 20 мА, двофазний	Температура: выход 4 ~ 20 мА, двофазний; напруга 0 ~ 2В DC для фази	
		Вологість: вихід 4 ~ 20 мА, двофазний	
Блок живлення	12 ~ 40В DC, > 120 мА		
Рабоча температура	-40 ~ 60 °C		
Вага	190 г		115 г
Габарити	Прилад: діаметр 90мм, товщина 54 мм Електрод: діаметр 8мм, довжина 150 мм Довжина электрода може бутиь індивідуальна		Розміри: 410 х діаметр 50 мм



а *б*

Рис.10.28. Вимірювачі вологості ґрунту:
а – RIXEN MTR-731та б – комбінований вимірювач ZD-06

На ринку технічних засобів автоматизації України представлені аналогічні датчики для автоматичних систем поливу ґрунту RIXEN, GARDENA, DEVI , Toro, комбіновані прилади: вологомір ґрунту / pH метр ZD-06, pH - метр / вологомір / електронний термометр PH-300 та ін.

Діелькометричний метод застосовується у георадіолокації. Основним параметром, за яким визначають властивості матеріалу за допомогою георадіолокації, являється його діелектрична проникність.

На рис.10.29 показаний **радіолокатор для визначення вологості ґрунту**, який суміщає в спільному корпусі вимірювач і датчик. Передавач вологоміра працює на частотах: 200, 400, 600, 800 і 1000 Мгц. Вимірювання виконуються з поверхні ґрунту за допомогою двох невеликих (7,5 см) антен.



Рис.10.29. Радіолокатор для визначення вологості ґрунту

Георадарні технології дозволяють отримувати безперервну інформацію про фізичні властивості ґрунтів швидко і в режимі реального часу. Недоліком такого типу приладів є те, що ними можна визначити вологість лише у верхньому шарі ґрунту на глибині до 10 см. Існують також обмеження, пов’язані зі складністю інтерпретації даних георадарного зондування. Такий же недолік мають і аерокосмічні прилади.

НВЧ-методи

Принцип дії НВЧ-вологомірів ґрунтується на визначенні вологості за відбитими електромагнітними хвилями, або хвилями, які пройшли крізь досліджуваний матеріал. Як інформативний параметр використовуються амплітуда, фаза або кут повороту площини поляризації лінійно-поляризованої електромагнітної хвилі. НВЧ-методи визначення вологовмісту характеризуються великою чутливістю, точністю та можливістю безконтактних вимірювань. Безперечною перевагою методу є незначна чутливість до фізико-хімічних властивостей досліджуваних речовин та матеріалів, що дає змогу аналізувати середовища з великими активними втратами. Вплив на результати вимірювання гранулометричного складу і структури досліджуваної речовини, фазового складу вологи, інших чинників зведено у НВЧ-вологомірах до мінімуму.

Розробником **надвисокочастотного вологоміра ґрунтових зразків СВП-5** є Білоруський державний аграрний технічний університет. Прилад призначений для експресного визначення вологості ґрунтів. Принцип дії його заснований на вимірюванні послаблення електромагнітної енергії надвисокочастотного (НВЧ) поля (10 Ггц) вологими зразками ґрунтів. За твердженням розробника обраний метод вимірювання у частотному діапазоні 10 Ггц дозволив виключити вплив хімічного складу ґрунтів на результат вимірювання вологості.

Недоліком СВП-5 є те, що він потребує відбору ґрунтових зразків ґрунтовим буром і не є репрезентатимним для окремого поля.

Оптичні методи

В основу оптичних методів покладено вимірювання вибіркового поглинання вологим ґрунтом електромагнітного випромінювання визначеної довжини хвилі або випромінювання, відбитого від поверхні ґрунту.

Інфрачервоний (ІЧ) спектральний метод вологометрії засновано на тому, що в спектрі з довжиною хвилі 0,8-6,1 мкМ вода має ряд досить сильних смуг поглинання різної інтенсивності (λ = 1,94 мкМ і λ = 2,48 мкМ). Перевагами ІЧ-методів є: висока чутливість, точність отримання значень вологості та можливість разом з вологою визначати інші компоненти речовини.



Рис.10.30. Інфрачервоний вологомір IRMM-106

На рис.10.30 показаний зовнішній вигляд інфрачервоного вологоміра IRMM-106. У промисловості застосовуються інфрачервоні вологоміри типу ВКИ-1, ВСМИ-1, АНАКОН, що вимірюють вогкість матеріалу в потоці на конвеєрі. Вимірювальна головка приладів встановлюється над стрічкою. Для компенсації впливу інших фізико-хімічних властивостей матеріалу використовується додаткове джерело інфрачервоного випромінювання.

Головним недоліком методу є можливість отримання інформації про вологість лише на поверхні ґрунту. Оскільки властивості поверхні матеріалу при висиханні значно змінюються, то результати вимірювань на поверхні відрізняються від глибинних. У порівнянні із надвисокочастотним в ІЧ-методі сильніше проявляється вплив розмірів частинок.

Контрольні запитання

1. Вимірювання яких величин забезпечують первинні вимірювальні перетворювачі?
2. За якими ознаками класифікують первинні вимірювальні перетворювачі?
3. Якими бувають первинні перетворювачі у залежності від характеру вихідного сигналу?
4. Що таке уніфікований сигнал?
5. Який пристрій називають термометром?
6. Який пристрій називають пірометром?
7. Які типи сучасних перетворювачів температури виготовляються АО "ТЕРА"?
8. Для чого застосовується багатозонний термоперетворювач (термопідвіска)?
9. В чому полягає особливість вимірювання температури ІЧ термометрами?
10. В чому полягає принцип роботи тепловізора?
11. На чому ґрунтується дія кулонометричних (електролізних) перетворювачів вологості?
12. На основі якої залежності діють сорбційно-імпедансні перетворювачі?
13. Які методи використовуються для вимірювання вологості ґрунту?
14. На чому заснований принцип роботи п'єзосорбційних перетворювачів вологи?
15. Які методи використовуються на практиці для вимірювання діелектричної проникності ґрунту?

РОЗДІЛ 11
ЛАБОРАТОРНІ ЗАНЯТТЯ З ВИВЧЕННЯ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Дослідження характеристик датчика освітленості та аналіз роботи приладу контролю полум`я

Об'єкт дослідження

Фотоголовка приладу ПКП-Ф з двома фоторезисторами ФС-К-6.

Мета роботи

Експериментально отримати статичну характеристику фотоголовки приладу ПКП-Ф.

Теоретичні відомості

При автоматизації різних виробничих процесів широке застосування знаходять фотоелектричні пристрої, які перетворюють світловий потік на електричний сигнал. Такі пристрої називають датчиками освітленості. Розрізняють три види таких датчиків:

- із зовнішнім фотоефектом (вакуумні або газонаповнені фотоелементи);
- з внутрішнім фотоефектом (фоторезистори);
- вентильні фотодіоди (фототранзистори).

Фоторезистори являють собою світлочутливий матеріал, нанесений на ізоляційну підкладку і покритий тонкою прозорою лаковою плівкою.

Принцип дії фоторезистора полягає в тому, що під дією світла в шарі світлочутливого матеріалу відбувається перерозподіл електронів по енергетичних рівнях, що призводить до зміни опору світлочутливого матеріалу. Найбільш поширені сірчано-кадмієві (ФС-К), сірчано-вісмутові (ФС-В) та сірчано-свинцеві (ФС-С) фоторезистори.

Прикладом застосування фоторезисторів на виробництві є прилад контролю полум'я, який використовують для контролю горіння пального в камерах згоряння стаціонарних і пересувних нагрівальних установок. При зникненні полум'я прилад припиняє подачу палива в камеру згоряння та вмикає сигналізацію.

Прилад ПКП-Ф являє собою фотоелектричне реле, яке складається з електромагнітного реле постійного струму KV (рис. 11.1), у коло живлення якого ввімкнуто фоторезистори R1 і R2. Реле живиться від однонапівперіодного випрямляча на діодах VD1 і VD2 з фільтрами CI і C2. Вмикання приладу в мережу змінного струму напругою 220 В проводиться апаратами керування нагрівальної установки, на якій змонтовано ПКП-Ф.

При натисканні на кнопку SB ("Пуск") її контактами шунтуються фоторезистори, фотоголовки та резистори R5 і R6. Це призводить до збільшення струму через котушку реле до рівня, необхідного для

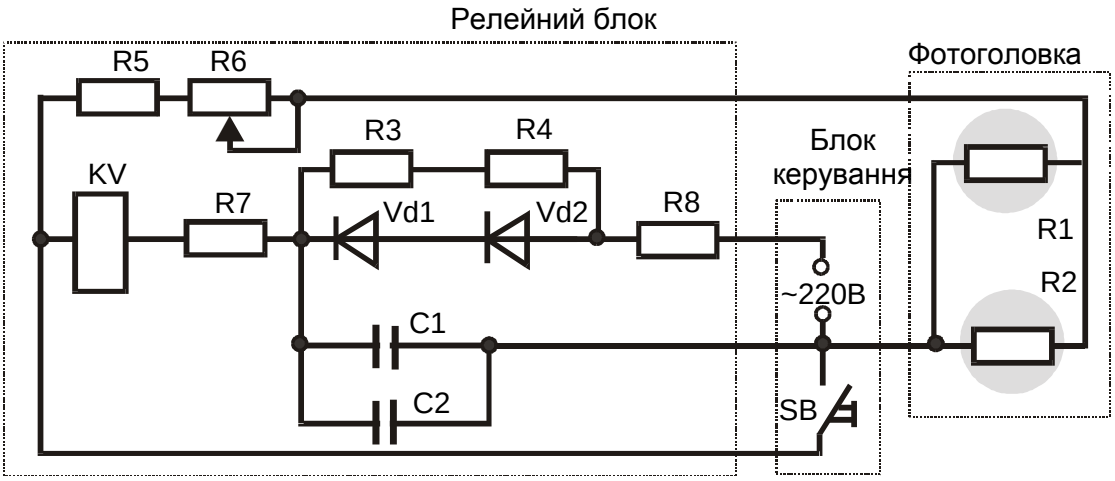


Рис. 11.1. Принципова електрична схема приладу ПКП-Ф

спрацювання реле. Своїми контактами реле вмикає пристрій подачі палива.

При нормальному полум'ї (освітленість фоторезисторів становить 5-50 Лк) опір фоторезисторів такий, при якому величина струму в колі живлення реле достатня для його утримання при відпущеній кнопці "Пуск".

Коли полум'я гасне освітленість фсторезисторів зменшується, їх опір збільшується, а струм в обмотці реле знижується. Реле спрацьовує і припиняє подачу палива в камеру згоряння теплогенератора та вмикає сигналізацію.

Резистор R6 використовується для регулювання порогу спрацювання приладу.Структуру приладу ПКП-Ф наведено на рис. 11.2.

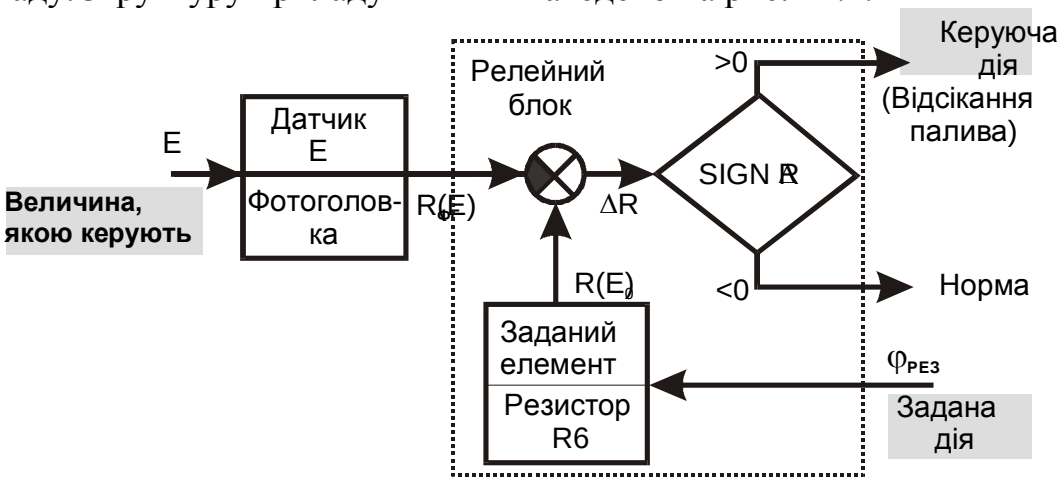


Рис. 11.2. Структура приладу ПКП-Ф

Основні характеристики фоторезистора ФС-К-6:

- площа робочої поверхні - 20 $мм^2$;
- робоча напруга – 20 В;
- постійна часу – 0,14 с;
- питома чутливість ~ 6000 мкА/(В*Лм).

Будова лабораторної установки

Установка являє собою змонтовані на панелі (рис.11.3):

- фотоголовку і релейний блок приладу контролю полум’я;

- освітлювальну лампу;
- міліамперметр;
- джерело стабілізованої напруги з вольтметром;
- регулятор напруги;
- тумблер комутації фотоголовки до релейного блока або до схеми зняття її статичної характеристики.

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з будовою і принципом дії ПКП-Ф.
2. Записати технічну характеристику досліджуваного приладу та вимірювальних приладів, що використовуються в роботі.
3. Установити тумблер комутації фотоголовки у верхнє положення, при якому вона підключається до вимірювальної схеми.

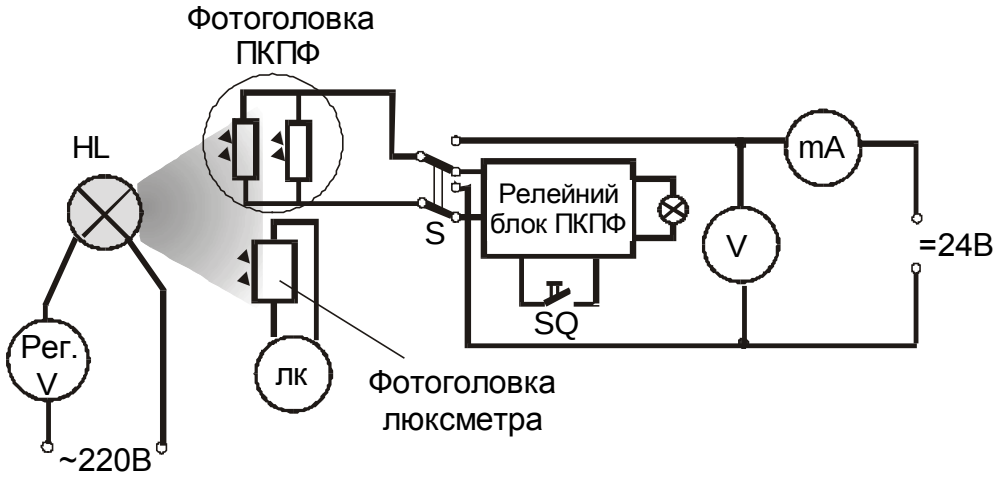


Рис. 11.3. Принципова електрична схема установки для зняття статичної характеристики фотоголовки

4. Ввімкнути установку.
5. Записати значення напруги U живлення фоторезисторів фотоголовки.
6. Зняти статичну характеристику фоторезисторів ФС-К-6 фотоголовки приладу. Для цього [21]:
   - змінювати рукояткою регулятора напругу на лампі таким чином, щоб освітленість фоторезисторів фотоголовки і щупа люксметра відповідала значенням E (табл. 11.1);
   - при встановлених значеннях E виміряти струм у колі фоторезисторів і записати його значення в табл. 11.1;
   - вимкнути установку;
   - за даними U та I обчислити опір фоторезисторів R;
   - використовуючи формулу Ф = SE, де S – робоча площа фоторезисторів, обчислити світловий потік Ф;
   - обчислити питому чутливість фотоголовки К за формулою:

$$K=\frac{\Delta I}{U\cdot\Delta\Phi}\left[\frac{мкА}{В\cdot лм}\right]$$

Визначення питомої чутливості фоторезисторів фотоголовки приладу ПКП-Ф

Таблиця 11.1

Результати перевірки питомої чутливості фоторезисторів фотоголовки приладу ПКП-Ф

E, лк	30	60	90	120	150	180	210	240	270
I, мА									
R, КОм									
Δ I, мкА									
Ф, лм									
Δ Ф, лм									
K, $\frac{мкА}{В\cdot лм}$									

Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- назву та мету роботи;
- технічну характеристику приладів, що використовувалися в роботі;
- функціональну схему приладу ПКП-Ф;
- електричні схеми лабораторних установок;
- таблицю з експериментальними і розрахунковими даними;
- розрахункові формули і статичну характеристику фотоголовки;
- висновки по роботі з аналізом експериментально отриманої статичної характеристики;
- відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. На якому явищі базується принцип дії фоторезистора?
2. Назвіть вхідний і вихідний сигнали фоторезистора як датчика освітленості.
3. Що являє собою статична характеристика фотоголовки приладу ПКП-Ф?

Як за допомогою статичної характеристики визначити коефіцієнт підсилення фотоголовки?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Вивчення та аналіз роботи датчика частоти обертання приводного вала системи автоматичного контролю завантаження приводного вала

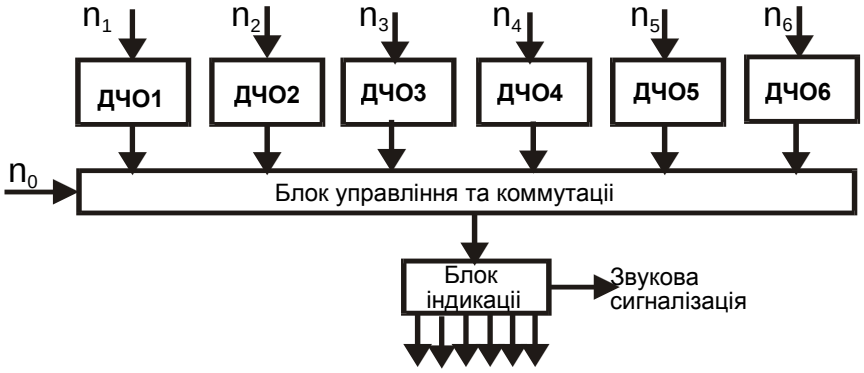


Рис. 11.4 Блок схема УСАК –6В

Об'єкт дослідження. Датчик частоти обертання універсальної системи автоматичного контролю завантаження приводного вала УСАК-6В.

***Мета роботи*:**

- вивчити призначення, будову і принцип дії датчика частоти обертання (ДЧО) приводного вала УСАК- 6В (рис.11.4);
- проаналізувати структуру системи;
- оцінити точність спрацювання системи при заданих настройках.

Теоретичні відомості

Основною умовою ефективного використання сільськогосподарських машин є оптимальне завантаження їх робочих органів, при якому задана потужність силового агрегату забезпечується при мінімальних витратах підведеної до нього енергії.

УСАК-6В призначена для контролю завантаження приводних валів робочих органів за частотою їх обертання та формування світлового і звукового сигналів при зниженні частоти обертання відносно заданого рівня в результаті збільшення навантаження.

Система складається з:

1. Датчиків частоти обертання (не більше шести).
2. Блока управління, який має:
   – перемикач настройки системи;
   – перемикач встановлення кількості приєднаних датчиків частоти обертання;
   – клеми для подачі живлення;
   – штепсельні роз'єми "ДАТЧИКИ" і "ІНДИКАТОР" для підключення датчиків і блока індикаторів;
   – два запобіжники кола живлення системи на 2А і кола звукового сигналу на 5А;
   – перемикач режимів роботи системи "КОНТРОЛЬ-ВИМІРИ"(К-В).
3. Блока індикації з лампочкою наявності живлення, шістьма сигнальними лампочками датчиків частоти обертання, вимикачами живлення системи

"ВКЛ" і звукового сигналу "ГУДОК".

Система працює таким чином [21]. Датчик частоти обертання приводного вала являє собою постійний магніт з двома обмотками, розміщений у сталевому корпусі, та індуктор на приводному валу (рис. 11.5).

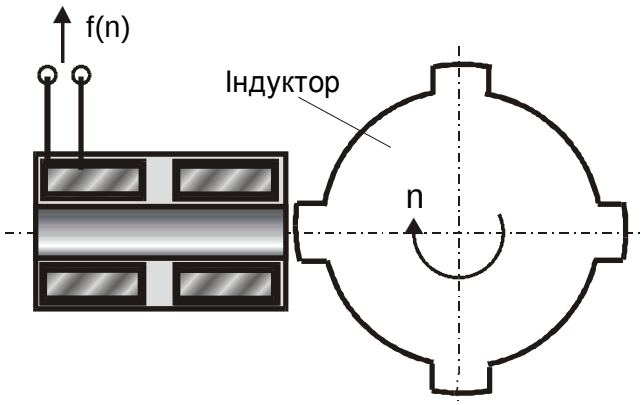


Рис. 11.5. Конструкція датчика частоти обертання

Принцип дії датчика базується на явищі електромагнітної індукції – наведення ЕРС у провіднику, який знаходиться в змінному магнітному полі.

ДЧО перетворює частоту обертання вала на електричні імпульси напруги, які підсилюються і використовуються для управління електронним ключем К (рис.11.6). При замиканні ключа К через нього розряджається конденсатор С, який заряджається з постійною швидкістю при розімкнутому К від джерела постійної напруги U. Якщо частота обертання приводного вала n більша заданого значення n_0, то конденсатор за невеликий період слідування імпульсів не встигає зарядитися до напруги відкривання тиратрона U_T. Тиратрон не запалюється, і розрядка конденсатора здійснюється через ключ К. При $n < n_0$ період слідування імпульсів напруги від ДЧО збільшується. За цей час конденсатор встигає зарядитися до U_T. Тиратрон відкривається (запалюється), і конденсатор розряджається через нього. При цьому з'являється світлова сигналізація на блоці індикації у вигляді періодичного спалахування тиратрона, і вмикається гудок .

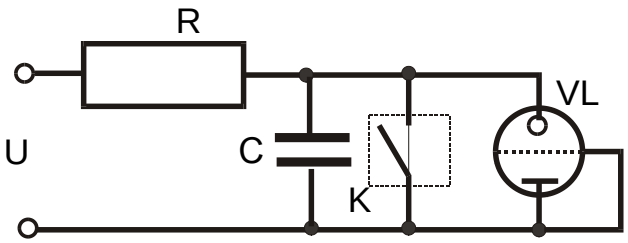


Рис. 11.6 Принципова електрична схема одного канала блока індикації

Для перевірки роботи основних блоків системи в процесі експлуатації застосовується блок контролю. Він являє собою генератор імпульсів, частота слідування яких більша за частоту імпульсів від ДЧО. При вмиканні режиму "КОНТРОЛЬ" імпульси від генератора одночасно подаються на входи всіх шести каналів. Виникнення сигналів "ВІДСУТНІСТЬ ВІДХИЛЕНЬ" у вигляді мигання тиратронів з великою частотою свідчить про роботоздатність системи.

Будова лабораторної установки

Лабораторна установка складається із:

– змонтованих на панелі основних блоків УСАК-6В;

– електродвигуна постійного струму, який обертає вал з індуктором датчика

частоти обертання УСАК;

– тиратронного регулятора напруги зі змінною настройкою, який використовується для зміни напруги живлення двигуна Д і, в свою чергу, для зміни частоти обертання його вала;

– покажчика частоти обертання (УЧО) зі своїм датчиком частоти обертання, який являє собою трифазний генератор.

Схему лабораторної установки наведено на рис.11.7.

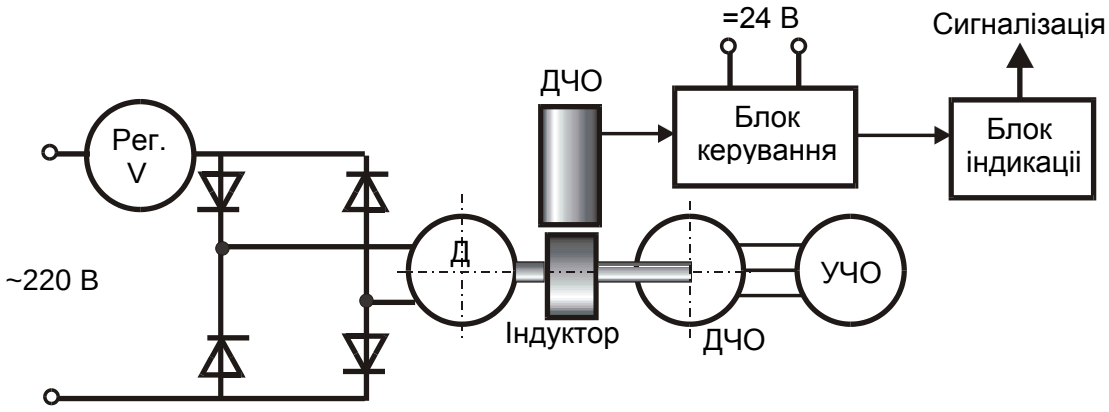


Рис.11.7. Принципова електрична схема лабораторної установки

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з призначенням, будовою і принципом дії системи УСАК-6В.
2. Записати паспортні дані приладів, що використовуються в роботі.
3. Ввімкнути установку.
4. Ввімкнути вимикач живлення УСАК на блоці індикації та проконтролювати подачу живлення за контрольною лампою "ВКЛ"(має загорітися).
5. Встановити перемикачем на блоці індикації задану викладачем частоту обертання вала $n_{СПР\,0}$, при якій повинна спрацювати система.
6. Плавно збільшуючи регулятором напруги частоту обертання електродвигуна, вивести частоту обертання до погасання сигнальної лампи.
7. Повільно зменшувати регулятором V частоту обертання вала і в момент загоряння сигнальної лампи на блоці індикації за покажчиком частоти обертання відмітити частоту обертання спрацювання системи $n_{СПР.}$ Вимірювання повторити п'ять разів. Результати занести в таблицю 11.2.

Таблиця 11.2

Результати дослідження датчика частоти обертання

$n_{СПР}$, $м^{-1}$	500	400	300	200	100
$n_{СПР1}$, $м^{-1}$					
$n_{СПР2}$, $м^{-1}$					
$n_{СПР3}$, $м^{-1}$					
$n_{СПР4}$, $м^{-1}$					
$n_{СПР5}$, $м^{-1}$					
$n_{СПР\ СР}$, $м^{-}$					

8. Обчислити середнє значення частоти обертання $n_{СПР\ СР}$, при якому спрацьовує система, та відносну похибку спрацювання.
9. Повторити пункти 7,8 при інших настройках системи $n_{СПР\ 0}$.
10. Зробити висновки по роботі.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити:
- мету і назву роботи;
- технічні характеристики приладів, які використовувались у роботі;
- блок-схему УСАК-6В та схему лабораторної установки;
- таблицю з даними експериментальних досліджень спрацювання датчика частоти обертання системи;
- висновки з аналізом спрацювання датчика частоти обертання УСАК при відмінності настройках.

Контрольні запитання

1. Призначення датчика частоти обертання приводного вала.
2. Що є чутливим елементом УСАК?
3. У вигляді якого сигналу в УСАК формується задана дія?
4. На якому явищі базується робота датчика частоти обертання УСАК?
5. Як здійснюється перевірка роботоздатності системи?
6. Чим для УСАК є частота обертання вала?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Дослідження характеристик сельсинної системи дистанційної передачі кута

Об'єкт дослідження

Сельсинна система дистанційної передачі кута, яка складається із з'єднаних між собою трифазних сельсина-датчика (СД) та сельсина-приймача (СП).

Мета роботи:

- вивчити призначення, будову, принцип дії сельсинної системи дистанційної передачі кута;
- провести аналіз роботи системи в трансформаторному режимі;
- провести аналіз роботи системи в індикаторному режимі.

Теоретичні відомості

Необхідність у дистанційній передачі кута зустрічається в різних технічних пристроях. До них належать різноманітні системи дистанційного керування (слідкуючі системи). Такі системи часто реалізуються за допомогою сельсинів. Сельсинна система дистанційної передачі кута

складається з сельсин-датчика (СД) , сельсин-приймача (СП) і ліній зв'язку між ними. Сельсини являють собою малогабаритні синхронні електричні машини (рис.11.8) із обмотками на нерухомому статорі і рухомому роторі. На статорі розташовані три однакових обмотки, осі яких зміщені під кутом 120^0 одна від одної. Обмотки статора з'єднані між собою зіркою.

На роторах сельсинів розташовані по одній обмотці до яких підводиться змінна напруга.

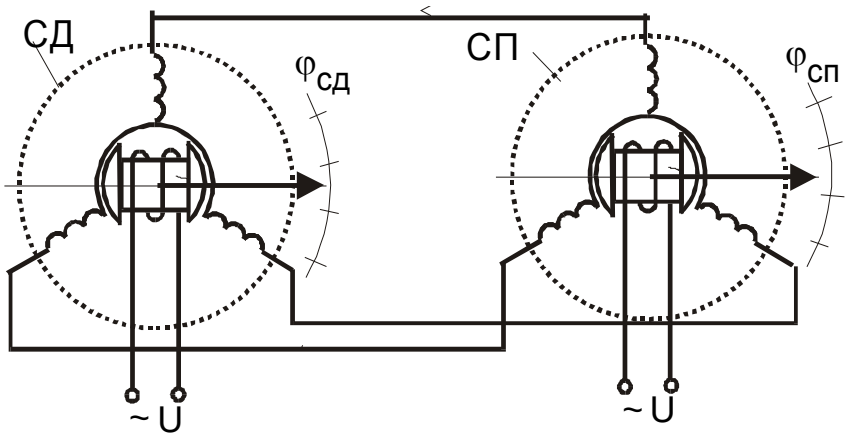


Рис. 11.8. Принципова електрична схема сельсинної системи

Принцип дії сельсинної установки полягає в наступному.

СД сприймає кут повороту його ротора з обмоткою та перетворює його на перерозподіл змінних ЕРС у своїх фазових обмотках.

СП сприймає фазові ЕРС СД та перетворює їх або в напругу на його роторній обмотці (у трансформаторному режимі) або в кут повороту свого ротора (в індикаторному режимі).

При роботі системи в індикаторному режимі обмотка ротора СП живиться від тієї ж самої мережі змінного струму, що і обмотка ротора СД.

При повороті ротора СД на кут $\varphi_{СД}$ здійснюється перерозподіл змінних ЕРС у статорних обмотках СД і СП. Ротор СП, який являє собою електромагніт змінного струму, буде намагатись зайняти положення, що збігається з напрямом сумарного магнітного поля статора СП.

При роботі системи в трансформаторному режимі обмотка ротора СП вмикається на навантаження Rн. У цьому випадку в ній індукується напруга $U_{ВИХ}$, пропорційна різниці $\varphi_{СД} - \varphi_{СП}$.

Будова лабораторної установки

Лабораторна установка - це змонтовані на панелі (рис. 11.9.) :

- СД і СП;
- вимикач К, який забезпечує включення і виключення опору навантаження в коло обмотки ротора сильсина-приймача;
- вимикач S1, який забезпечує переключення режимів роботи сельсинів з трансформаторного режиму (в нижньому положенні вимикача) на індикаторний (у верхньому положенні вимикача);
- регулятор напруги для живлення сельсинів змінним струмом напругою 100 В.

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з будовою і принципом дії сельсинної системи [21].

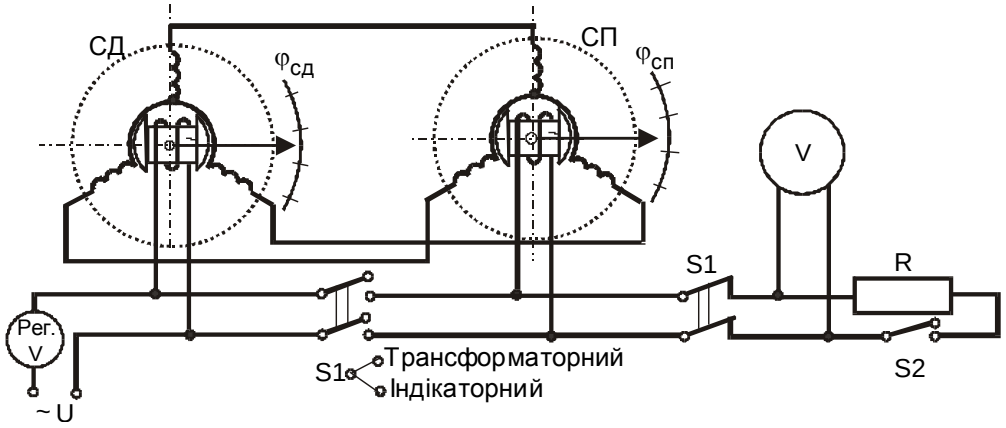


Рис. 11.9. Принципова електрична схема дослідження роботи сельсинної системи в трансформаторному режимі і режимі дистанційної передачі кута

2. Нарисувати схему дослідження системи у трансформаторному та індикаторному режимах. Записати технічні характеристики приладів, які використовуються в роботі.
3. Ввімкнути лабораторну установку.
4. Перемикач S1 перевести в нижнє положення для включення трансформаторного режиму роботи сельсинів.
5. Встановити за допомогою регулятора напругу живлення сельсинів 100 В.
6. Встановити ротор СД у нульове положення $\varphi_{СД}=0$ і зафіксувати його в цьому положенні.
7. Змінюючи положення ротора СП, встановити на вольтметрі найменшу напругу на обмотці ротора СП. Зафіксувати ротор СП у такому положенні.
8. Обертаючи ротор СД на 10 градусів у діапазоні від 0 до 180 градусів, виміряти напругу на обмотці ротора СП у режимі холостого ходу U_{XX} та при навантаженні $R_Н$ =750 Ом. Отримані дані занести до табл. 11.3.

Таблиця. 11.3

Результати дослідження роботи сельсинної системи в трансформаторному режимі

$\varphi_{СД}$, град	0	10	20	30	…	…	160	170	180
U_{XX}, В									
$U_Н$, В									

9. Вимкнути установку.
10. На одному графіку побудувати залежності $U_{XX}(\varphi_{СД})$ та $U_Н(\varphi_{СД})$.
11. Перевести перемикач у верхнє положення для включення індикаторного режиму роботи сельсинів.
12. Дослідити роботу системи в індикаторному режимі, для чого, обертаючи ротор СД на 10 градусів у діапазоні від 0 до 180 градусів, відмітити відповідне положення ротора СП $\varphi_{СП}$.

    Дані занести до табл. 11.4.

Таблиця. 11.4

Результати дослідження роботи сельсинної системи в індикаторному режимі

$\varphi_{СД}$, град	0	10	20	30	…	…	160	170	180
$\varphi_{СП}$, град									

13. Вимкнути установку.
14. Побудувати графік залежності $\varphi_{СП}(\varphi_{СД})$.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- назву та мету роботи;
- технічні характеристики приладів, які використовувалися в роботі;
- схему дослідження сельсинної системи;
- таблиці і графіки отриманих залежностей: $U_{XX}(\varphi_{СД})$,$U_{Н}(\varphi_{СД})$ та $\varphi_{СП}(\varphi_{СД})$;
- висновки з аналізом отриманих залежностей для трансформаторного та індикаторного режимів;
- відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Призначання сельсинної системи.
2. Поясніть будову сельсина-датчика та сельсина-приймача.
3. Чим розрізняються індикаторний і трансформаторний режими роботи сельсинної системи?
4. Що є вхідними і вихідними сигналами для сельсинної системи дистанційної передачі кута у випадках її роботи в індикаторному та трансформаторному режимах?
5. Що являє собою статична характеристика сельсинів при їх роботі в трансформаторному режимі?
6. Що являє собою статична характеристика системи при її роботі в трансформаторному та індикаторному режимах?
7. Як змінюється статична характеристика сельсинів, працюючих в трансформаторному режимі при включенні навантаження в коло обмотки ротора СП?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Дослідження роботи позиційного регулятора температури повітря ЦР8001/2 у складі системи стабілізації температури повітря в термостаті

Об'єкт дослідження

Позиційний регулятор температури повітря ЦР8001/2 у складі системи стабілізації температури повітря в термостаті.

Мета роботи :

- вивчити принцип дії та особливості структури системи;
- проаналізувати роботу позиційного регулятора температури повітря ЦР8001/2 в режимі стабілізації температури повітря.

Теоретичні відомості

Система стабілізації температури повітря (газу, рідини) у заданій місткості підтримує температуру Т на заданому рівні T_0 з заданою точністю у процесі зміни збурень, що викликають відхилення Т від T_0. Такі системи включають у себе об'єкт управління (ОУ) - місткість, у якій здійснюється стабілізація температури, та автоматичний керуючий пристрій (АКП) - регулятор температури, що здійснює керуючі дії на ОУ для підтримання Т на рівні То [21].

Функціональну схему замкненої системи стабілізації температури зображено на рис. 11.10

Задана дія G(t),яка подається до АКП, забезпечує формування в ньому заданого значення температури $T_0(G(t))$. Фактичне значення температури Т вводиться до АКП через основний зворотний зв'язок (ОЗЗ), в котрий включено датчик температури (сприймаючий елемент).

Керуюча дія U(t) в таких системах формується АКП с використанням інформації про відхилення Т від То тобто інформації про $\Delta T = T_0 - T$. При цьому говорять, що така система працює за принципом відхилення.

Замкнені системи, які працюють за принципом відхилення, забезпечують на усталених режимах роботи високу статичну точність стабілізації керованої величини (в даному випадку - температури повітря Т) за рахунок того, що керуюча дія буде змінюватися доти, доки існує відхилення Т від T_0.. Як тільки відхилення стає рівним нулю керуюча дія перестає змінюватися. і за умови незмінності збурень, які діють на ОУ, керована величина Т стабілізується на заданому рівні T_0

Регулюючими органами об'єкту управління, що використовуються АКП для стабілізації температури повітря в приміщенні, є нагрівальний елемент (НЕ) та вентилятор (М).

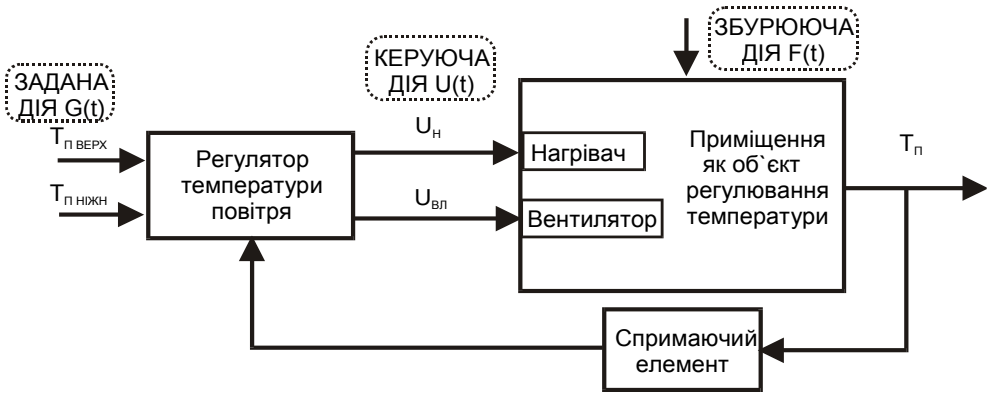


Рис. 11.10. Функціональна схема замкненої системи стабілізації температури повітря в приміщенні, що включає позиційний регулятор температури

При цьому керуюча дія з боку АКП формується у вигляді вмикання НЕ при T < To, та вмикання ВЛ і вимикання НЕ при $T > T_0$.

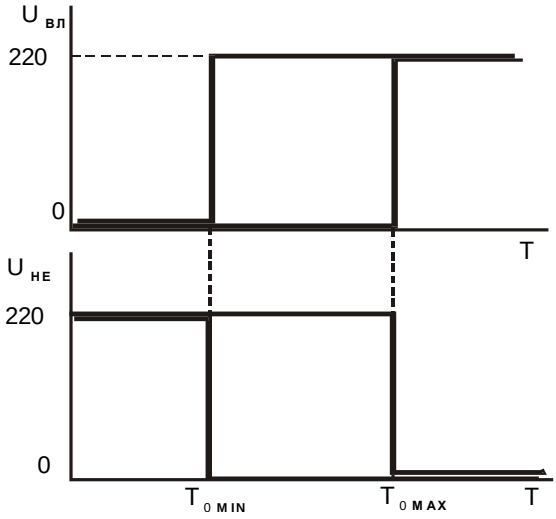


Рис. 11.11. Статична характеристика двопозиційного регулятора температури

ОУ в сільському господарстві, в яких виникає потреба в стабілізації температури, як правило, мають високу інерційність. Через це в системах стабілізації температури практично завжди використовують найбільш прості і дешеві позиційні регулятори.

Вони забезпечують формування керуючої дії відповідно до статичної характеристики регулятора, що являє собою залежність управляючого впливу регулятора температури $U_{НЕ}$ і $U_{ВЛ}$ (тобто вихідного сигналу регулятора) від розузгодження ΔT, що є його вхіднім сигналом. Статична характеристика регулятора температури показана на рис. 11.11.

З рисунка видно, що в статичній характеристиці позиційного регулятора є зона неоднозначності $\Delta T_0 = T_{0\ мах} - T_{0\ min}$, завдяки якій включення і виключення НЕ (виключення і включення ВЛ) виникає при різних температурах, що відрізняються на величину ΔT_0 .Наявність зони неоднозначності ΔT_0 в характеристиці регулятора температури приводить до того, що в замкнутих системах стабілізації температури з таким регулятором усталений режим роботи, на якому $T = T_0$, неможливий. Температура повітря в таких системах на усталених режимах роботи постійно змінюється, здійснюючи коливання відносно якогось середнього значення $T_{0\ ср}$. Причиною цього є те, що при $T \le T_{0\ min}$ позиційний регулятор вмикає тільки НЕ , який збільшує T до $T_{0мах}$, а при $T \ge T_{0мах}$ тільки ВЛ , який зменшує T до $T_{0\ min}$.

Введення в статичну характеристику регулятора температури зони неоднозначності (гістерезису) усуває можливість повторних спрацювань позиційного регулятора на режимах перемикань при $T = T_o$ і підвищує тим

самим , запас стійкості замкненої системи, що включає в себе позиційний регулятор.

Задана дія (ЗД), що прикладається до регулятора температури для його настройки на задану температуру T_0 і зону неоднозначності ΔT_0 , формується оператором у вигляді повороту відповідних ручок настройки регулятора.

Сприймаючим елементом (СЕ) вимірювального пристрою (ВП) регулятора температури є мідний термометр опору ТСМ, який вмикається в одне плече вимірювальної мостової схеми змінного струму.

В інші плечі схеми ввімкнуто потенціометри, пов'язані з ручками настройки регулятора. Сигнал, пропорційний відхиленню Т від T_0, формується мостовою схемою, яка виконує функції ВП, у вигляді напруги в діагоналі моста, фаза якої визначається знаком відхилення. Після підсилення напруга перетворюється на постійну напругу, полярність якої також залежить від знака відхилення. Цією напругою живиться електромагнітне реле, що управляє включеннями НЕ та ВЛ в процесі стабілізації температури повітря в термостаті (приміщенні).

Будова лабораторної установки

Лабораторна установка містить (рис. 11.12) [21]:

- позиційний регулятор температури ЦР8001/2 з цифровим індикатором;
- датчик температури ТСМ;
- термостат як об'єкт регулювання температури повітря із вмонтованими в нього нагрівачем та вентилятором, що виконує функції управляючих органів об'єкта;
- тумблер SA для відключення регулятора температури від термостата при його настройці.

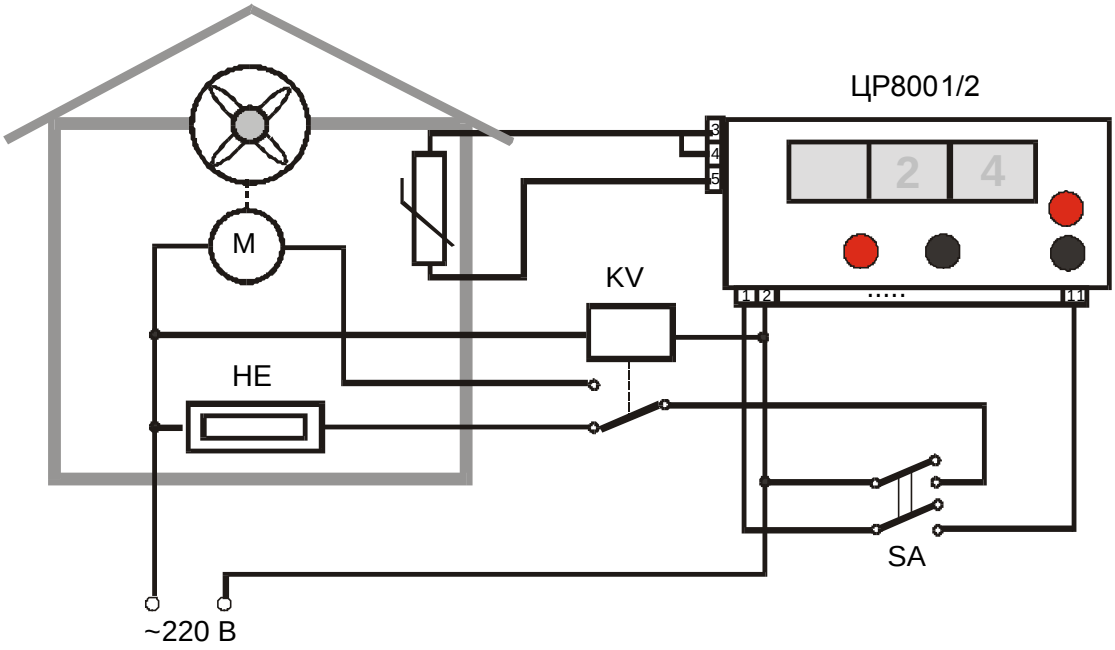


Рис. 11.12. Принципова електрична схема лабораторної установки

Технічна характеристика регулятора ЦР8001/2:

- діапазон регулювання температури -60... +180°С;
- клас точності 0,5;
- напруга живлення 220 В ± 10%;
- діапазон комутації активного навантаження змінним струмом 0,1 –0,2А напругою 220 В ;

Порядок проведення роботи:

1. Ознайомитись з призначенням і принципом дії регулятора температури.
2. Записати технічні характеристики регулятора, та вимірювальних приладів, які використовуються в роботі.
3. Підготувати на чернетці таблиці для результатів вимірювань.
4. Вимкнути тумблер SA для виключення регулятора температури від термостата, після чого включити напругу, що подається на схему досліджуваної системи. На цифровому індикаторі регулятора температури з'явиться інформація про фактичне значення температури повітря в термостаті, яке треба занести в графу таблиці, що відповідає моменту часу t=0.
5. Настроїти регулятор температури на задані значення $T_{0\ max}$ і $T_{0\ min}$, визначені викладачем, для чого натиснути червону кнопку на лицевій панелі регулятора температури і, повертати червону ручку до тих пір, доки на цифровому табло регулятора не з'явиться значення температури, рівне $T_{0\ max}$. Відпустити червону кнопку, після чого натиснути чорну кнопку і, повертати чорну ручку до тих пір, доки на цифровому табло не з'явиться значення температури, рівне $T_{0\ min}$. Відпустити чорну кнопку.
6. Ввімкнути тумблер ВК. При цьому включиться нагрівальний елемент, про що сигналізує лампочка на схемі системи. Починаючи з цього моменту, проводити фіксацію температури в таблиці з інтервалом 30 с. Виміри температури проводити до моменту часу, коли нагрівальний елемент включиться четвертий раз.
7. За отриманими результатами вимірювання температури Т повітря в термостаті побудувати графік залежності температурі Т від часу t.
8. Нижче побудованого графіка побудувати два графіки залежності $U_{НЕ}$ і $U_{ВЛ}$ від часу t (залежності керуючій дії регулятора від часу в процесі стабілізації температури).
9. Зробити висновки по роботі, в яких проаналізувати характер зміни температури повітря в термостаті в процесі її стабілізації і причини такої зміни.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- назву лабораторної роботи , її мету;
- технічні характеристики регулятора температури та приладів, які використовуються в роботі;
- електричну схему лабораторної установки;

- таблиці з результатами вимірювань;
- графіки залежності T(t), $U_{НЕ}(t)$ і $U_{ВЛ}(t)$, зображені один під одним;
- висновки по роботі з аналізом роботи регулятора температури повітря в термостаті;
- відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Зобразіть структурну функціональну схему автоматичної системи стабілізації температури повітря в термостаті.
2. У вигляді чого в даній автоматичній системі регулятор температури формує керуючу дію?
3. Назвіть регулюючі органи об'єкта.
4. Що являє собою статична характеристика позиційного регулятора температури?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

Дослідження характеристик магнітного підсилювача

Об'єкт дослідження

Магнітний підсилювач з внутрішнім зворотним зв'язком (ЗЗ) та обмоткою зміщення.

Мета роботи:

- ознайомитися з будовою і принципом дії магнітного підсилювача;
- експериментально зняти статичні характеристики МП при заданих значеннях струму зміщення $I_{ЗМ}$ і опору зворотного зв'язку $R_{ЗЗ}$;
- обчислити коефіцієнти підсилення МП $K_{МП}$ і коефіцієнт зворотного зв'язку $K_{зз}$.

Теоретичні відомості

Магнітні підсилювачі являють собою феромагнітні пристрої, що використовуються для підсилення потужності керуючого сигналу, який формується регулюючим пристроєм автоматичної системи. Вхідним сигналом для МП як самостійного функціонального елемента системи є керуючий сигнал У. Одночасно з підсиленням сигналу МП здійснює його перетворення: керуючий сигнал, що формується у вигляді постійного струму Іупр, перетворюється на сигнал змінного струму $I_Н$ великої напруги [21].

Принцип дії МП полягає в залежності індуктивності (і у свою чергу індуктивного опору) дроселя від підмагнічування постійним струмом.

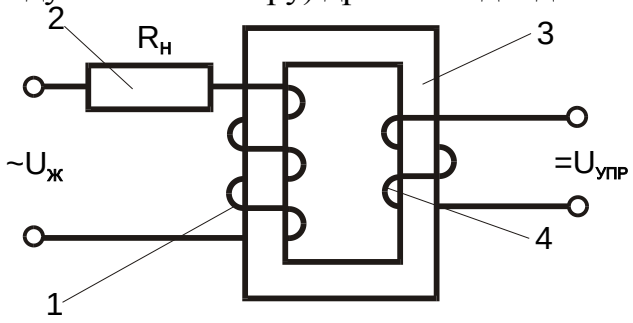


Рис. 11. 13. Будова найпростішого магнітного .підсилювача:

1 – робоча обмотка;
2 – опір навантаження;
3 – феромагнітне осердя;
4 – обмотка управління

Найпростіший МП - це феромагнітне осердя 3 (рис. 11.13) з двома обмотками: робочою 1 і управління 4. Живлення робочої обмотки здійснюється від джерела змінної напруги $U_Ж$ через опір навантаження $R_Н$, а обмотки управління - від джерела постійної напруги. При збільшенні струму $I_{УПР}$ в обмотці управління збільшується підмагнічування дроселя цим струмом і , відповідно, зменшується магнітна проникність феромагнітного осердя. Це призводить до зменшення індуктивності дроселя $L_{ДР}$ і, у свою чергу, до зменшення індуктивного опору робочої обмотки $X_{РОБ}$.Внаслідок цього змінюється струм в опорі навантаження згідно з виразом:

$$I_н = \frac{U_ж}{Z_н},$$

де $Z_Н$ - повний опір навантаження і робочої обмотки.

$$Z_н = \sqrt{(\omega \cdot L_{др})^2 + (R_н + R_{др})^2},$$

де $L_{ДР}$, $R_{ДР}$ - індуктивність та активний опір робочої обмотки; $R_Н$ - опір навантаження; ω - кутова частота напруги живлення робочої обмотки.

Статична характеристика МП являє собою залежність $I_Н$ від $I_{упр}$. Для МП, який розглянуто вище, вона має вигляд, зображений на рис. 11.14. Коефіцієнт підсилення МП - це тангенс кута α нахилу дотичної до заданої точки статичної характеристики:

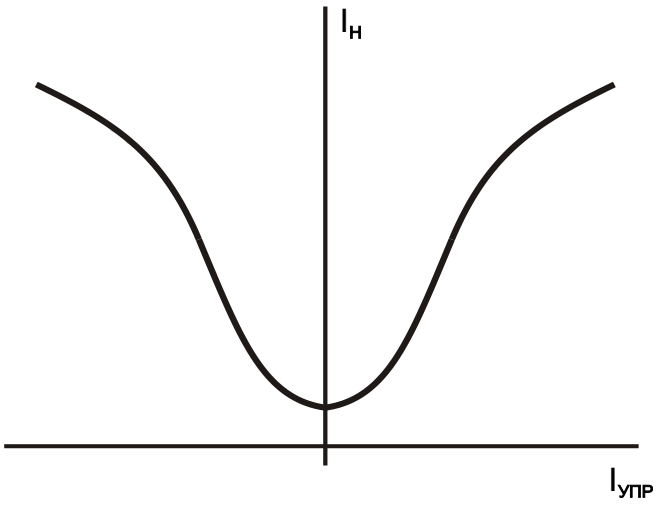


Рис. 11.14. Статична характеристика найпростішого магнітного підсилювача

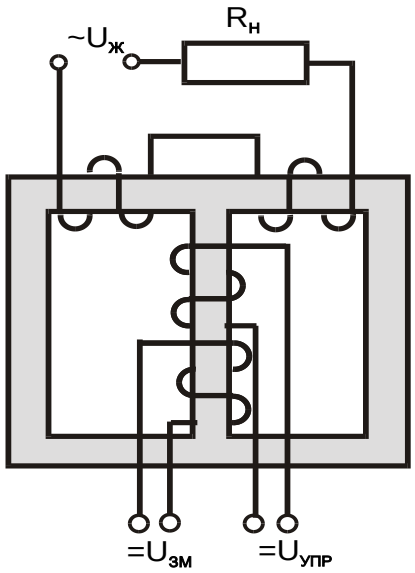


Рис. 11.15. Будова магнітного підсилювача на Ш-подібному осерді

$$K_{МП} = tg\alpha = \frac{dI_н}{dI_{упр}} \approx \frac{\Delta I_н}{\Delta I_{упр}}$$

Статична характеристика МП є нелінійною. Таким чином, коефіцієнт підсилення МП для різних режимів роботи різний. Для одержання більшого коефіцієнта підсилення доцільно працювати на ділянці статичної характеристики МП з найбільшою крутістю.

Розглянута схема МП не знайшла практичного застосування через наявність таких недоліків:

- змінний струм у робочій обмотці внаслідок явища взаємоіндукції спотворює вхідний сигнал і порушує нормальну роботу МП;
- МП не реагує на знак вхідного сигналу $I_{УПР}$;
- недостатня величина коефіцієнта підсилення МП -$К_{МП}$.

Тому на практиці застосовують МП, виконані на основі Ш-подібних або двох П-подібних осердь (рис. 11.15). У таких МП обмотка управління розміщується на середньому стержні, а половини робочої - на крайніх. У даному випадку змінні магнітні потоки, які створюються кожною половиною робочої обмотки, в середньому стержні осердя спрямовані назустріч одне одному і повністю компенсуються. Для забезпечення чутливості МП до полярності вхідного сигналу застосовується обмотка зміщення $W_{ЗМ}$, яка живиться від стабілізованого підсилювача з обмоткою зміщення.джерела постійного струму $U_{ЗМ}$. Для збільшення значення коефіцієнта підсилення МП застосовують додатній зворотний зв'язок. Останній може бути зовнішній, внутрішній і змішаний.

Схема МП з внутрішнім зворотним зв'язком (ЗЗ) називається схемою із самозміщенням (рис.11.16). Додаткове підмагнічування осердя, пропорційне струму навантаження $I_Н$, буде створюватись постійною складовою випрямленого діодами змінного струму.

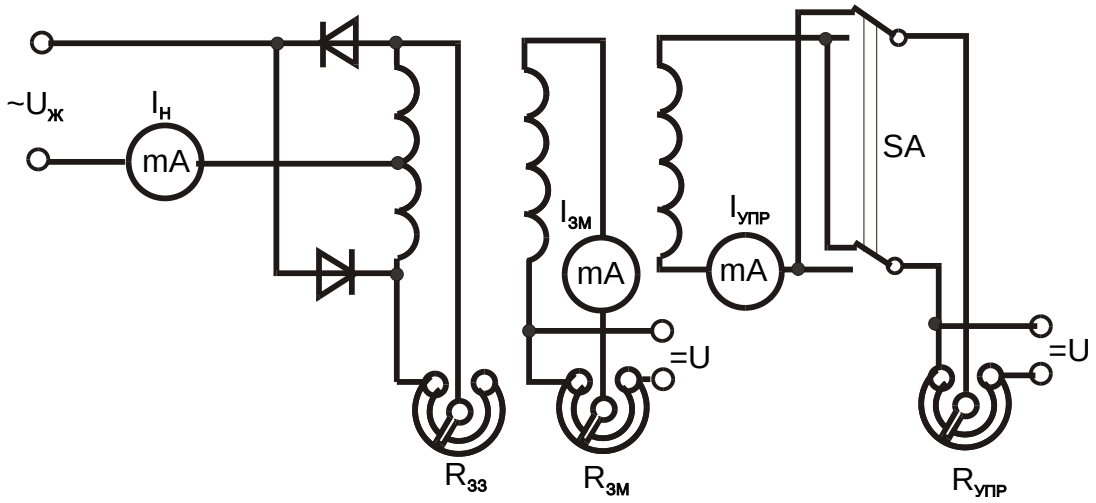


Рис.11.16. Будова лабораторної установки для дослідження характеристик магнітного підсилювача із зовнішнім зворотним зв'язком та обмоткою

Величина зворотного зв'язку змінюється змінним резистором $R_{ЗЗ}$. При $R_{ЗЗ}$=0 зворотний зв'язок у МП відсутній, оскільки в робочих обмотках не буде постійної складової струму. При збільшенні опору $R_{ЗЗ}$ випрямлений діодами струм протікатиме через робочу обмотку і підмагнічуватиме осердя.

Величина зворотного зв'язку оцінюється коефіцієнтом зворотного зв'язку. Останній можна визначити з виразу:

$$К_{зз} = \frac{К_{мпзз} - К_{мп}}{К_{мпзз} \cdot К_{мп}},$$

де: $К_{МП}$ - коефіцієнт підсилення МП без зворотного зв'язку;
$К_{МПЗЗ}$ - коефіцієнт МП, охопленого додатнім зворотним зв'язком.

Будова лабораторної установки

Лабораторна установка являє собою МП з внутрішнім ЗЗ і обмоткою зміщення (рис.11.16) з вимірювальною схемою, змонтованою на передній панелі стола.

У коло робочої обмотки $L_{РОБ}$ (коло навантаження) вмикається міліамперметр mA.

Величина зворотного зв'язку встановлюється за допомогою реостата $R_{ЗЗ}$, який увімкнуто в коло випрямляча струму навантаження. Струм в обмотці зміщення встановлюється за допомогою реостата $R_{ЗМ}$, ввімкнутого в коло обмотки зміщення. Величина струму зміщення контролюється за допомогою міліамперметра, який позначено "$I_{ЗМ}$". Струм в обмотці управління встановлюється за допомогою реостата $R_{УПР}$, який разом з перемикачам, що змінює полярність струму управління, ввімкнуто в коло обмотки управління. Величина струму управління контролюється міліамперметром, який позначено "$I_{УПР}$".

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись *з* призначенням, будовою і принципом дії магнітного підсилювача.
2. Записати технічні характеристики приладів, що використовуються в даній роботі.
3. Ввімкнути установку.
4. За допомогою відповідних реостатів встановити задані значення $R_{ЗЗ}$ і $I_{ЗМ.}$
5. Змінюючи за допомогою реостата $R_{УПР}$ величину $I_{УПР}$, виміряти значення струму навантаження $I_Н$ і занести його в таблицю.
6. Повторити пункти 4 і 5 для заданих значень опору зворотного зв`язку $R_{ЗЗ}$ та струму зміщення $I_{ЗМ}$. Звернути увагу на те, що перед переключенням полярності $I_{УПР}$ необхідно установити $I_{УПР}$=0. Результати вимірів записати в таблицю 11.5.

Таблиця 11.5

Результати дослідження характеристик магнітного підсилювача

$I_{УПР,}$ мА	- 80	- 60	- 40	- 20	0	20	40	60	80
$I_Н$, мА при $R_{ЗЗ}$=…; $I_{ЗМ}$=…									
$I_Н$, мА при $R_{ЗЗ}$=…; $I_{ЗМ}$=…									
$I_Н$, мА при $R_{ЗЗ}$=…; $I_{ЗМ}$=…									
$I_Н$, мА при $R_{ЗЗ}$=…; $I_{ЗМ}$=…									

7. Зобразити статичні характеристики МП.
8. Вибрати на цих характеристиках лінійні ділянки з максимальною крутістю

і визначити коефіцієнт підсилення МП ($К_{МП}$).

9. Для відповідних пар характеристик МП, які відрізняються тільки $R_{ЗЗ}$, визначити коефіцієнт зворотного зв'язку $К_{ЗЗ}$.
10. Зробити висновки за результатами дослідження характеристик МП з аналізом впливу $R_{ЗЗ}$ і $I_{ЗМ}$ на $К_{МП}$.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- назву та мету роботи;
- технічні характеристики приладів, які використовувались у роботі;
- таблиці та графічні залежності з результатами експериментальних досліджень МП;
- результати розрахунків коефіцієнтів підсилення МП без зворотнього зв'язку $К_{МП}$ і з зворотним зв'язком $К_{МПЗЗ}$, а також коефіцієнтів підсилення зворотного звя'зку $К_{ЗЗ}$;
- висновки по роботі з аналізом вплив опору зворотного зв'язку $R_{ЗЗ}$ та струму зміщення $I_{ЗМ}$ на величину коефіцієнта підсилення МП;
- відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Призначення магнітних підсилювачів.
2. Вплив величини струму в обмотці зміщення на коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача.
3. Вплив величини опору зворотного зв'язку на коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача.
4. Вхідний і вихідний сигнали для магнітного підсилювача як елемента автоматики.
5. З якою метою у конструкції магнітного підсилювача передбачено обмотки зміщення і зворотного зв'язку?
6. Що являє собою статична характеристика магнітного підсилювача?
7. Як за статичною характеристикою магнітного підсилювача визначити його коефіцієнт підсилення?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Дослідження роботи датчика контролю висіву та датчика рівня у складі універсальної системи контролю за висівом УСК

Об'єкт дослідження

- Датчик контролю висіву (датчик частоти обертання висівного диск) у складі універсальної системи контролю за висівом УСК

Мета роботи:

- вивчити призначення, будову і принцип дії датчика контролю висіву (датчик частоти обертання висівного диск) у складі універсальної системи

контролю за висівом УСК;
- дослідити роботу системи в різних ситуаціях, які можуть мати-місце в процесі її експлуатації;
- перевірити відповідність деяких технічних характеристик системи, встановленої на стенді, паспортним даним.

Теоретичні відомості

У сільськогосподарському виробництві широкого розповсюдження набули системи автоматичного контролю за правильністю виконання різних технологічних операцій, які дозволяють полегшити роботу механізаторів і можуть стати їх надійними помічниками. Такі системи не можуть самостійно змінювати хід технологічного процесу, однак вони дозволяють оператору своєчасно втручатися в його хід і усувати причини, що призвели до відхилення параметрів процесу від норми. До таких систем належать системи УСК, КЕДР та інші, які контролюють роботу органів посівних агрегатів [21].

У сівалках досить часто порушується нормальна робота механізмів через засмічення сошника сторонніми предметами, що призводить до припинення подачі насіння в сошник. Все це викликає нерівномірність висіву насіння, що значно знижує врожайність. Автоматичний контроль за роботою сівалок дозволяє механізатору зосередитись на веденні агрегату для забезпечення прямолінійності рядків та заданого стикування, що значно підвищує ефективність виробництва сільськогосподарської продукції.

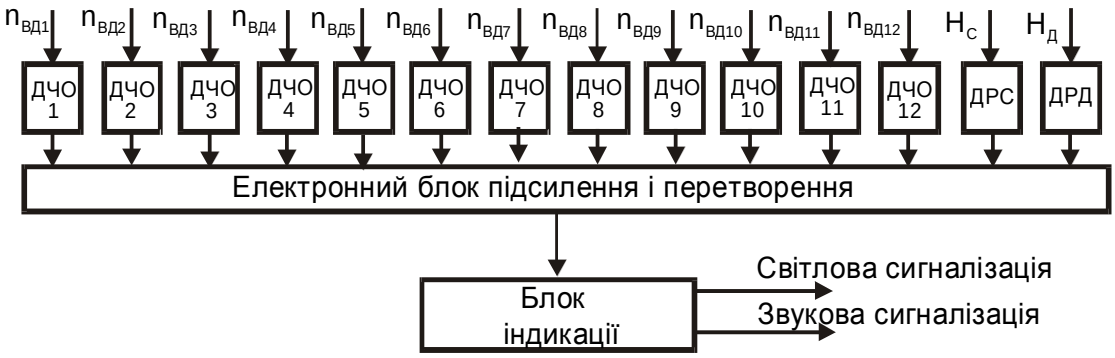


Рис. 11.17. Блок-схема УСК

Універсальна система типу УСК призначена для контролю роботи механізмів сівалки ОСТ-12Б та її модифікацій, рівня насіння і добрив у бункерах сівалки та формування світлового і звукового сигналів у разі припинення висіву і зниження рівня насіння в бункері нижче допустимого.

Технічні характеристики УСК

1. Тип системи – електронний.
2. Тип датчиків – фотоелектронний.
3. Живлення – від системи електрообладнання машин.
4. Напруга живлення – від акумулятора трактора від 10 до 15В.
5. Споживана потужність – менше 35 Вт.

6. Кількість контрольованих каналів:
   для висіву – 12;
   для рівня – 2.
7. Система має світлову і однократну звукову індикацію при зниженні рівня посівного матеріалу або мінеральних добрив у бункерах нижче встановленого.
8. Система має переривисту звукову індикацію при включенні перемикача БЛОКИР.
9. Час затримки в каналі для висіву регулюється від $0.4_{+0.2}^{-0.1}$с до $1.2_{+0.4}^{-0.6}$с.
10. Система запам'ятовує номер індикаторного каналу.

При перериванні зв'язку в каналі між електронним блоком і пультом системи або при короткому замиканні на виходах стабілізаторів в електронному блоці звучить постійна звукова сигналізація.

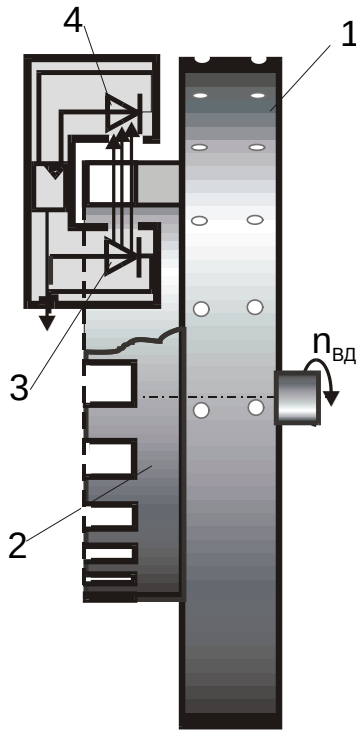


Рис. 11.18. Конструкція датчика частоти обертання висівного диска :
1 – висівний диск;
2 – моделюючий диск;
3 – світлодіод;
4 – фотодіод

Система складається із:

− дванадцяти датчиків контролю висіву (ДЧО), які встановлюються в кожному сошнику (рис. 1);

− двох датчиків рівня (ДР) насіння і добрива в бункерах;

− електронного блока підсилення і перетворення;

− блока індикації;

− з'єднувальних кабелів.

Датчик контролю висіву (датчик частоти обертання висівного диска) являє собою П-подібний корпус (рис. 11.18), в якому розміщені світлодіод 3, фотодіод 4 та електронний підсилювач. Датчик виробляє імпульси, відповідні перериванню зубцями моделюючого диска 2 світлового променя від світлодіода, який потрапляє на фотодіод. При проходженні зубців моделюючого диска 2 через промінь світлодіода в колі фотодіода змінюється струм і на виході підсилювача виникають імпульси напруги, що свідчить про обертання висівного диска 1, тобто про наявність висіву.

Аналогічну конструкцію має датчик рівня, у П-подібному корпусі якого розміщено освітлювальну лампочку та фоторезистор. При освітленні фоторезистора його опір зменшується і струм у колі датчика збільшується. У заповненому зерном бункері датчик знаходиться в його шарі, і фоторезистор не освітлюється. Його опір у даному випадку становить десятки Мом, і струм у колі датчика практично відсутній.

Електронний блок підсилення і перетворення монтується на корпусі сівалки. Він призначений для оцінки сигналів датчиків висіву і вироблення сигналів для включення відповідної сигналізації на пульті і включає в себе:

− дванадцять автономних каналів висіву;

- мультивібратор для самоконтролю;
- стабілізатори напруги 6 і 8 В;
- схеми управління стабілізаторами;
- схеми регулювання часу реакції каналів сигналізації.

Блок індикації монтується в кабіні трактора. Він виробляє відповідну звукову і світлову сигналізації і забезпечує :

- світлову індикацію "ОТКАЗ", що вказує номер каналу, в якому порушено процес висіву, і супроводжується переривчастою звуковою сигналізацією;
- світлову індикацію "УРОВ У" або "УРОВ С", що вказує на те, що рівень добрива або насіння нижчий заданого, що супроводжується однократною звуковою сигналізацією;
- світлову індикацію "ПИТ" при включенні напруги живлення;
- мигаючу світлову індикацію "ПИТ" і відсутність звукової сигналізації при натиснутій кнопці "ПРОВ" в процесі перевірки УСК;
- відсутність світлової індикації "ПИТ" і безперервну звукову сигналізацію при перериванні або розчепленні кабеля між електронним блоком і блоком індикації, а також при короткому замиканні на виходах стабілізаторів в електронному блоці.

Живлення блока індикації однопровідне. На його лицевій панелі знаходяться :

- перемикач "ПИТ" для включення напруги живлення;
- запобіжник на 3 А;
- перемикач "БЛОКИР" для включення системи в режим блокування;
- кнопка "ПРОВ" для перевірки справності системи;
- потенціометр "РЕГУЛ" – для регулювання затримки індикації у каналах контролю за висівом.

.

Будова лабораторної установки

Лабораторна установка являє собою змонтовану на панелі систему УСК, до складу якої входять [21]:

- блок індикації ;
- електронний блок ;
- датчик частоти обертання висівного диска (датчик контролю висіву);
- датчик рівня добрив у бункері з насадкою, яка перекриває світловий промінь;
- висівний диск з модулюючим диском, зубці якого входять у проріз датчика частоти обертання (датчика контролю висіву);
- електродвигун привода висівного диска з тумблером подачі на нього напруги живлення.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомитися з призначенням, будовою і принципом дії системи УСК.
2. Записати паспортні дані системи.
3. Ввімкнути дослідну установку.
4. Ввімкнути вимикач ПИТ на блоці управління та проконтролювати подачу

живлення на УСК за загорянням лампочки ПИТ.

5. Дослідити роботу системи у вказанних нижче ситуаціях, які можуть мати місце в процесі експлуатації сівалки:

- зерно висівається (висівний диск обертається), бункер повний (шторка на датчику рівня закрита);
- висів припинився (зупинити висівний диск), бункер повний (шторка на датчику рівня закрита);
- зерно висівається (висівний диск обертається), спрацював датчик рівня (відкрити шторку на датчику рівня);
- висів припинився (зупинити висівний диск), спрацював датчик рівня (відкрити шторку на датчику рівня);
- ввімкнуто режим "ПЕРЕВІРКА" (натиснути кнопку "ПРОВ");

Таблиця 11.6

Результати дослідження системи УСК

Ситуація	Червона лампа "ОТКАЗ"	Червона лампа "УРОВ"	Звуковий сигнал	Червона лампа "ПИТ"

Виміряти:

- частоту висіву насіння, при якій вмикається сигналізація (насінин/с);
- час реакції на припинення висіву(с);
- тривалість звукового сигналу при контролі рівня насіння(с);
- частоту генератора мигаючого світла при відсутності несправностей у системі(Гц);
- частоту генератора мигаючого світла у випадку, коли є сигнал "ОТКАЗ"(Гц);

Зробити висновки по роботі.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- назву та мету роботи;
- технічну характеристику системи; УСК та ДЧО
- функціональну схему системи;
- таблицю результатів дослідження системи, результати вимірювань і висновки по роботі (табл. 11.6).

Контрольні запитання

1. Назвіть складові елементи системи УСК та їх призначення.
2. Сформулюйте призначення системи УСК.
3. Що є чутливими елементами системи УСК у каналах контролю висіву та рівня насіння?

4. Поясніть принцип дії датчика контролю висіву та датчика рівня.
5. Як здійснюється перевірка роботоздатності системи?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

Вивчення і аналіз роботи логічних елементів автоматики

Об'єкти дослідження:

- логічні елементи АБО та ТА-НІ;
- Т-тригер;
- чотирирозрядний двійковий лічильник;
- дешифратор.

Мета роботи:

- розширити теоретичні знання з виконання простих логічних операцій:
- перевірити роботу напівпровідникових логічних елементів, що реалізують прості логічні операції:
- ознайомитись з роботою тригера, лічильника, дешифратора.

Теоретичні відомості

Математична логіка оперує висловлюваннями, якими можуть бути будь-які судження. Останні оцінюються з точки зору їх правдивості та помилковості. Якщо висловлювання правдиве, то говорять, що його значення дорівнює "1", у протилежному випадку приймається, що воно дорівнює "0". Висловлювань (суджень), які одночасно були б і правдивими, і помилковими, не існує. Таким чином, висловлювання розглядають як змінну, яка може приймати тільки два значення: "0" або "1". Цю змінну називають логічною або, за ім'ям одного з основоположників математичної логіки Дж. Буля, булевою.

Над простими висловлюваннями можна виконувати логічні операції, результатом яких будуть складні висловлювання. Зв'язок між простими і складними висловлюваннями встановлюється за допомогою логічних формул. Вони складаються із зазначених висловлювань та символів логічних операцій і дозволяють встановити значення істинності складного висловлювання за значеннями простих висловлювань. У цьому розумінні складні висловлювання є логічною функцією від незалежних логічних аргументів, якими є прості висловлювання.

Розглянемо деякі найпростіші логічні операції.

Операція логічного "ЗАПЕРЕЧЕННЯ":

Логічна операція заперечення (або операція НІ) позначається рискою над символом, який означає певне висловлювання. Наприклад $\bar{A}$, де А - висловлювання (судження). У вигляді формули операція заперечення записується таким чином:

$$P = \bar{A} .$$

Цей запис читається: "Р не А". При цьому Р являється логічною функцією, а А – її аргументом. Логічна функція Р і її аргумент А є логічними змінними.

Таблиця істинності наведеної операції логічного заперечення (або операції НІ) визначається так:

A	0	1
P	1	0

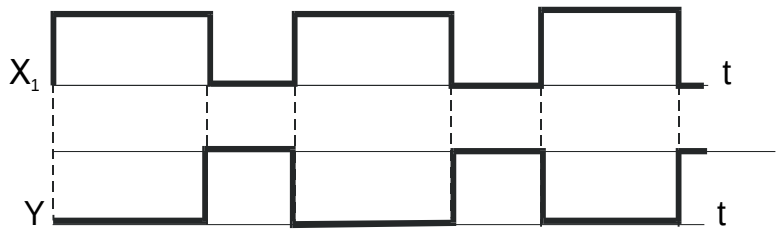


Рис. 11.19 Часова діаграма роботи логічного елемента НІ

Операція логічного ДОБУТКУ:

Ця логічна операція позначається символом Λ, який читається "Та". Наприклад: P = A Λ B. Наведена формула читається: “P є A та B”.

Складне висловлювання, одержане в результаті логічного добутку, істинне тільки тоді, коли істинні (не дорівнюють нулю) всі прості висловлювання, що складають цей добуток.

Таблиця істинності операції логічного добутку має вигляд:

A	0	0	1	1
B	0	1	0	1
P	0	0	0	1

Аналогічно, результат арифметичного добутку буде дорівнювати нулю, якщо хоча б один з множників дорівнює нулю. Результат відрізняється від нуля тільки тоді, коли всі множники відрізняються від нуля.

Часова діаграма роботи логічного елемента ТА має вигляд:

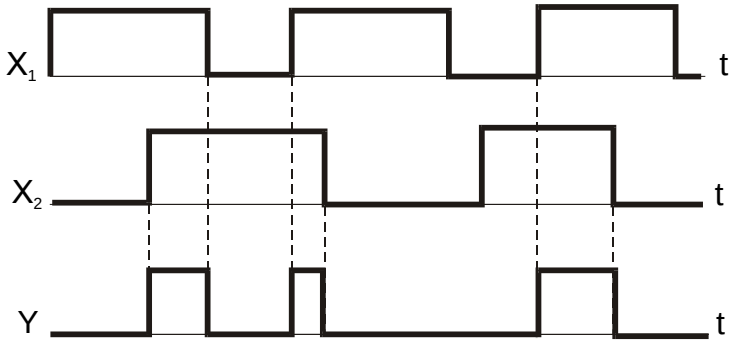


Рис. 11.20 Часова діаграма логічного елемента ТА

Операція логічного ДОДАВАННЯ :

Ця логічна операція позначається символом V, який читається "Або". Операція логічного додавання записується: P = A V B. Цей запис читається: “P є A або B”

Складне висловлювання, одержане в результаті логічного додавання, істинне тоді, коли істинним є хоча б одне з його складових. Таблиця істинності операції логічного додавання має вигляд:

A	0	0	1	1
B	0	1	0	1
P	0	1	1	1

Аналогічно, результат арифметичного додавання відрізняється від нуля, якщо хоча б один доданок відрізняється від нуля. Результат дорівнює нулю тільки тоді, коли всі доданки дорівнюють нулю.

Часова діаграма логічного елемента АБО має вигляд:

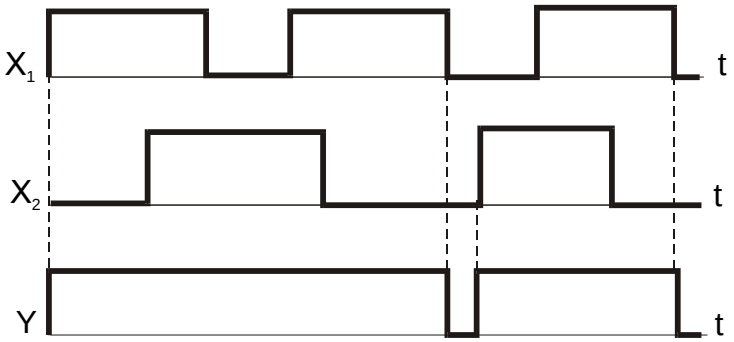


Рис. 11.21 Часова діаграма логічного елемента АБО

Логічні операції в електронних засобах реалізуються на логічних елементах. Джерелом логічних змінних може бути будь-який пристрій, що має два стійких стани. Наприклад: контакти можуть бути замкнуті або розімкнуті, напруга може бути або ні, тощо. Одному з цих станів присвоюють значення "1", а другому - "0". Позначають вхідні сигнали логічних елементів літерою "Х", а вихідні - "У". На принципових схемах логічні елементи, що виконують логічні операції "НІ", "ТА","АБО" зображують так, як наведено на рис. 4.

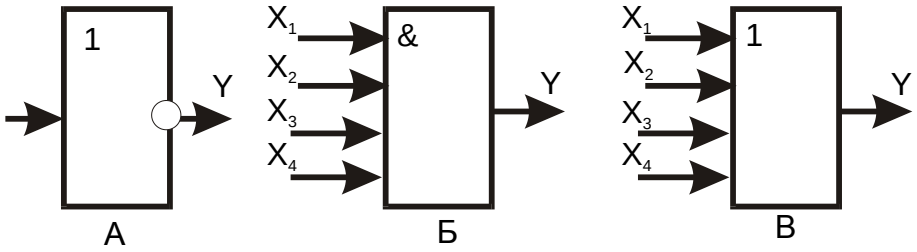


Рис. 11.22. Умовні позначення логічних елементів "НІ", "ТА", "АБО"

Логічні елементи можуть бути виконані на базі електромеханічних, пневматичних, електронних реле, а також за інтегральною технологією (мікросхеми).

На базі найпростіших логічних елементів будуються елементи, що реалізують більш складні логічні функції. До них належать тригери, лічильники, дешифратори та ін.

ТРИГЕР являє собою пристрій, який має два стійких стани. Перехід з одного стану в інший відбувається стрибкоподібно при зміні інформації на

входах тригера. Тригер має прямий **Q** та інверсний $\bar{Q}$ виходи. В одному із стійких станів на виході **Q** напруга є, а на $\bar{Q}$ - вона відсутня. В цьому випадку говорять: **Q** = 1, а $\bar{Q}$ = 0. В другому стійкому стані навпаки: **Q** = 1, а $\bar{Q}$ = 0.

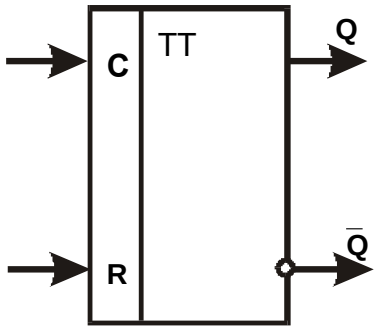


Рис. 11.23 Умовне позначення Т-тригера

Існують різні типи тригерів. У даній роботі розглянемо один з них, що має назву лічильного, або **Т**-тригера. Його умовне позначення наведено на рис. 5.

У даному тригері інформація у вигляді напруги надходить на вхід **С**. Вихідну інформацію можна знімати з будь-якого виходу. Вхід **R** призначений для початкового встановлення тригера (за наявності "1" на вході **R** на виході **Q** встановлюється "0").

Часову діаграму роботи **Т**-тригера наведено на рис. 6

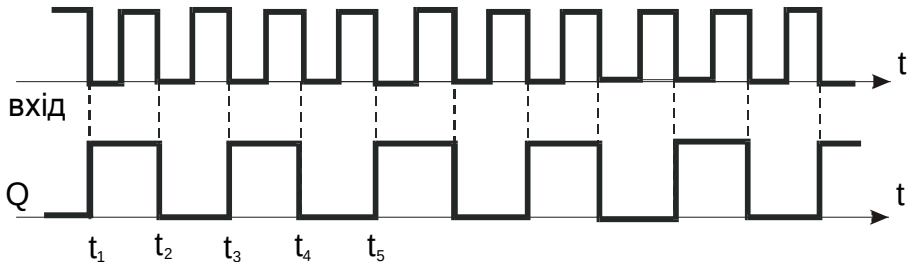


Рис. 11.24 Часова діаграма Т-тригера

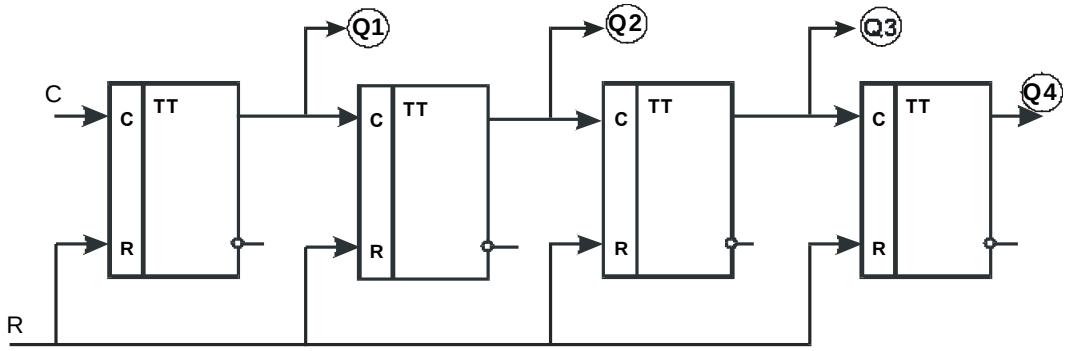


Рис. 11.25 Схема чотирирозрядного двійкового лічильника

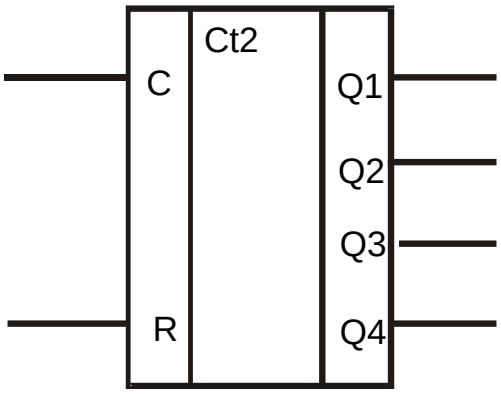


Рис. 11.26 Умовне позначення чотирирозрядного двійкового лічильника

Перекидання тригера проходить у моменти зникнення напруги на його вході (моменти t_1, t_2, t_3, t_n). З діаграми видно, що при такому спрацюванні тригера кількість імпульсів на виході в два рази менша, ніж на вході. Цю властивість Т-тригера використовують для побудови двійкових **ЛІЧИЛЬНИКІВ**, призначених для підрахунку кількості імпульсів, що надходять на вхід лічильника, та фіксації цього числа у вигляді двійкового коду. Кількість **Т**-тригерів у лічильнику визначає його розрядність. Схему чотирирозрядного двійкового лічильника наведено на рис.11.25, а умовне позначення - на рис. 11.26.

З діаграми видно, що, наприклад, у момент часу t_1 кількість імпульсів на

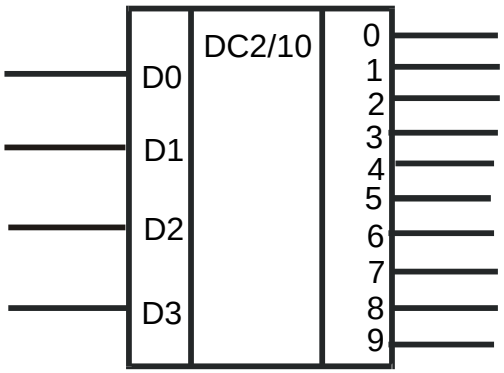


Рис. 11.27 Умовне позначення двійково-десяткового дешифратора

вході лічильника дорівнює 0 і його вихідний двійковий код має вигляд 0000 (тобто Q4 = 0, **Q3** = 0, **Q2** =0, **Q1** =0), а в момент часу t_2 кількість імпульсів на вході 3 і вихідний двійковий код має вигляд 0011 (тобто: **Q4** = 0; **Q3** = 0; **Q2** = 1, **Q1** = 1).

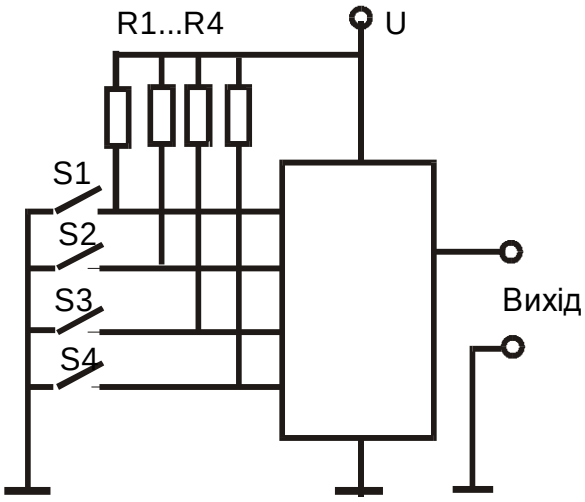


Рис. 11.28 Схема експериментальної установки для аналізу роботи найпростіших логічних елементів ТА-НІ і АБО

Кожну десяткову цифру N від 0 до 9 можна подати у вигляді:

$$\mathbf{N=Q_4\cdot 2^3 + Q_3\cdot 2^2 + Q_2\cdot 2^1 + Q_1\cdot 2^0,}$$

де коефіцієнти **Q1**, **Q2**, **Q3**, **Q4** можуть приймати значення 0 або 1.

Будова лабораторної установки

Лабораторна установка являє собою змонтовані на панелі логічні елементи АБО та ТА-НІ,Т-тригер, двійковий чотирирозрядний лічильник з

дешифратором. Виходи логічних елементів виведено на клеми **ВИХІД**, до яких підключається вольтметр. Напруга на входи елементів подається за допомогою вимикачів. Електричні схеми установок для дослідження логічних елементів аналогічні. Схему дослідження роботи логічного елемента АБО наведено на рис. 11.28.

Схему для аналізу роботи Т-тригера наведено на рис. 11.29. До виходів тригера підключені світлодіоди та клеми, до яких підключається вольтметр, а подача імпульсів на вхід моделюється за допомогою вимикача.

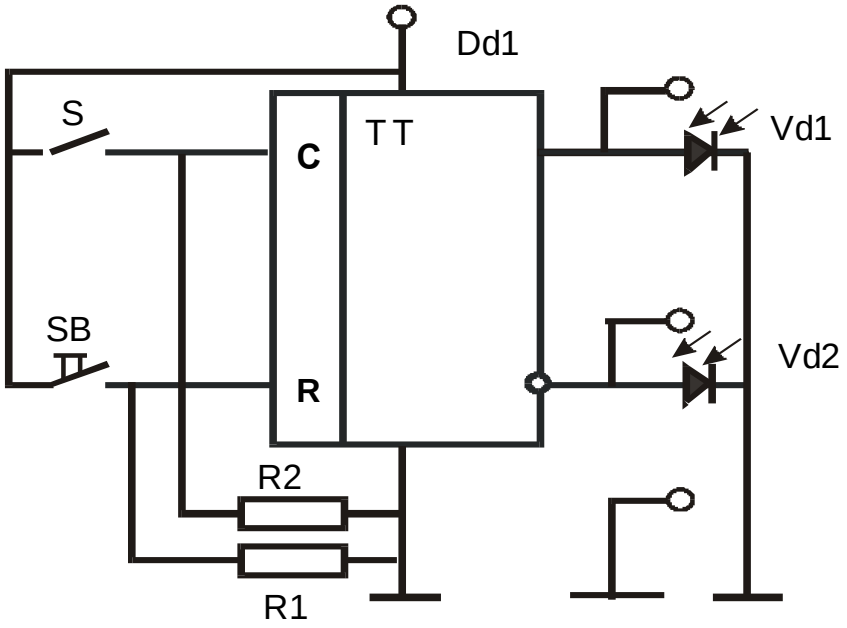


Рис. 11.29 Схема експериментальної установки для аналізу роботи Т-тригера

Електричну схему установки для аналізу роботи лічильника та дешифратора наведено на рис. 11.30. До виходів двійкового лічильника

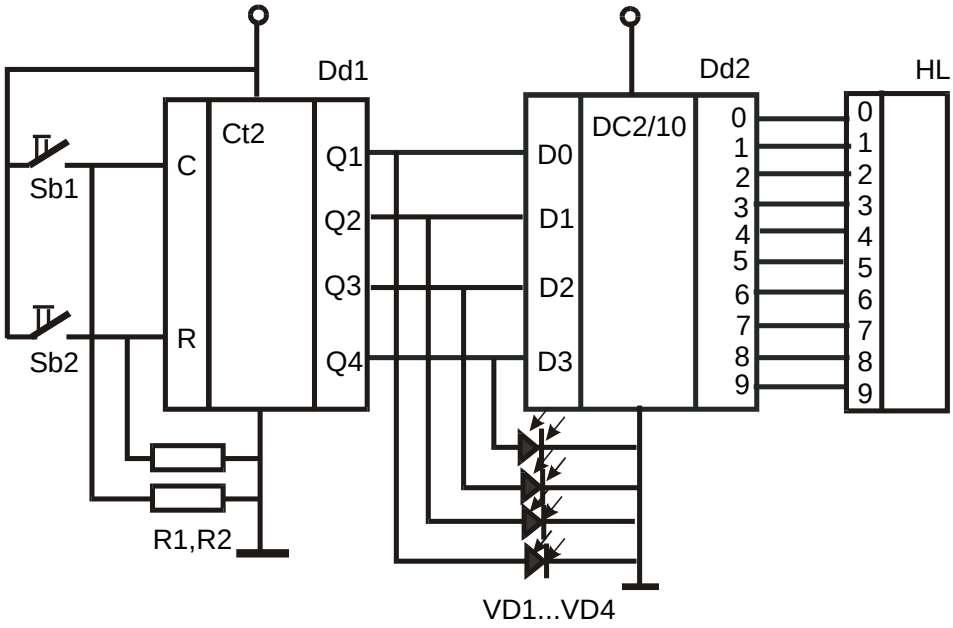


Рис. 11.30 Схема експериментальної установки для аналізу роботи лічильника і дешифратора

Порядок проведення роботи

приєднано світлодіоди та входи дешифратора. На вихід останнього ввімкнуто цифровий індикатор.
Подача імпульсів на вхід лічильника моделюється за допомогою кнопки SB1.

1. Ознайомитись з призначенням, принципом дії логічних елементів АБО , ТА-НІ, Т-тригера, двійкового чотирирозрядного лічильника, дешифратора, а також будовою лабораторних установок, технічними характеристиками приладів, що використовуються в роботі [21].
2. Подати живлення на лабораторний стенд.
3. Перебрати всі можливі комбінації нулів та одиниць (0 – контакти вимикача розімкнуто, 1 – контакти вимикача замкнуто) на вході в логічні елементи (всього 16 комбінацій), вимірюючи при цьому напругу на виході елементів. Результати вимірів записати в табл.11.7
4. Нарисувати схеми лабораторних установок і записати в таблицю.
5. Технічні характеристики приладів, що використовуються в роботі.
6. Подати живлення на лабораторний стенд.
7. Перебрати всі можливі комбінації нулів та одиниць (0 – контакти вимикача розімкнуто, 1 – контакти вимикача замкнуто) на вході в логічні елементи (всього 16 комбінацій), вимірюючи при цьому, напругу на виході елементів. Результати вимірів записати в табл.11.7.
8. Проаналізувати роботу Т-тригера, імітуючи подачу імпульсу на його вхід за допомогою вимикача S (О - контакти вимикача розімкнуто, 1 - контакти вимикача замкнуто). Результати вимірів для виходу Q записати в табл. 11.8.
9. Нарисувати часову діаграму роботи Т-тригера.
10. Проаналізувати роботу лічильника і дешифратора, для чого спочатку натиснути на кнопку СБРОС для обнулення вихідних сигналів лічильника і дешифратора. Показання лічильника і дешифратора, які відповідають кількості імпульсів на їх входах, занести в табл. 11.9. Натискуючи кнопку SB один раз, імітуємо подачу одного імпульсу на вхід лічильника. Покази лічильника і дешифратора, які відповідають кожному імпульсу, занести до табл.11.9, послідовно добавляючи на вхід лічильника по одному імпульсу.

Таблиця11.7

Результати дослідження роботи логічних елементів

№	Вхідні сигнали				Вихідні сигнали			
					АБО		ТА-НІ	
	X1	X2	X3	X4	$U_{ВИХ}$	Y	$U_{ВИХ}$	Y
1								
2								
3								
…								
…								
16								

Примітка. Якщо $U_{ВИХ} > 2.4$В, то вважається, що логічний сигнал на виході дорівнює 1. При $U_{ВИХ} < 0,4$ В він дорівнює 0.

Таблиця11.8

Результати дослідження роботи Т-тригера

C	0	1	0	1	0	1	0	1	0
$U_{ВИХ}$									
Q									

Таблиця11.9

Результати дослідження роботи лічильника та дешифратора

Кількість імпульсів на вході	Q4	Q3	Q2	Q1	Покази індикатора
0					
1					
…					
…					
10					
11					

Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- назву та мету роботи;
- таблицю із технічними характеристиками приладів, які використовувалися в роботі;
- схеми лабораторних установок, таблиці і часові діаграми з результатами досліджень;
- висновки з кожного етапу роботи з аналізом результатів досліджень;
- відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Зобразіть часову діаграму роботи Т-тригера.

2. Зобразіть часову діаграму роботи двійкового чотирирозрядного лічильника .
3. Визначте за часовою діаграмою роботи лічильника двійковий код десяткових чисел 1, 2, 3, 4, 5, 6, *7,* 8, 9, 10, 11.
4. Поясніть, що розуміють під словами "перекидання" тригера?
5. Як на електричних принципових схемах зображують логічні елементи ТА, АБО, НІ, ТА-НІ, АБО-НІ?
6. Що означають логічні операції НІ, ТА, АБО?
7. Як в алгебрі логіки позначають логічні операції додавання, множення, заперечення, множення із запереченням, додавання із запереченням?

Примітка. Технічні характеристики вимірювальних приладів занести до табл. 11.10.

Таблиця11.10

Технічні характеристики вимірювальних приладів

№ п/п	Назва, тип	Тип вимірювальної системи	Клас точності	Діапазон вимірювань

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

Вивчення реле часу та аналіз їх роботи

Об'єкт дослідження

Реле часу РВП-2, ВС-10-316, ВЛ-37, 2РВМ, РВ.

***Мета роботи*:**

- ознайомитися з принципом дії вказаних реле часу;
- виконати настройку пневматичного реле часу РВП-2 і електромеханічного реле часу РВ на задану викладачем затримку спрацювання;
- оцінити точність спрацювання реле РВП-2 і РВ.

Теоретичні відомості

Реле часу забезпечує задану часову затримку при передачі сигналу від одного елемента до іншого, а також керує роботою устаткування за заданою часовою програмою. На відміну від звичайних реле, реле часу додатково має вузол затримки спрацювання (замикання або розмикання контактів). Він може бути електричний, пневматичний, механічній та ін.

Розглянемо деякі реле часу, що найчастіше використовуються в сільськогосподарському виробництві.

Реле часу ВС-10-31

Вузол затримки такого реле електромеханічний. Він складається з асинхронного електродвигуна, що через редуктор (рис. 11.31) обертає вал, на якому закріплено три диски з лімбами. На дисках знаходяться упори, які через кулачки діють на контактні групи. Момент замикання (розмикання) контактів залежить від кута встановлення дисків відносно вала. Встановлення заданої часової затримки виконується шляхом повороту дисків

на певний кут відповідно до поділок лімба. Диски фіксуються на валу за допомогою затискної гайки.

Контактна група реле складається з трьох пар перемикаючих контактів. Після відпрацювання повної програми обертання осі з дисками припиняється розмиканням контактів живлення двигуна за допомогою важеля на кінці робочого валу.

Затримка часу, яка забезпечується цим реле, знаходиться у межах від 2 до 60 с. Крок зміни настройки реле - 1,5 с. Приведена похибка часу спрацювання - 0,7%. Напруга живлення - 220, 127, 110, 12 В змінного струму при частоті 50 Гц.

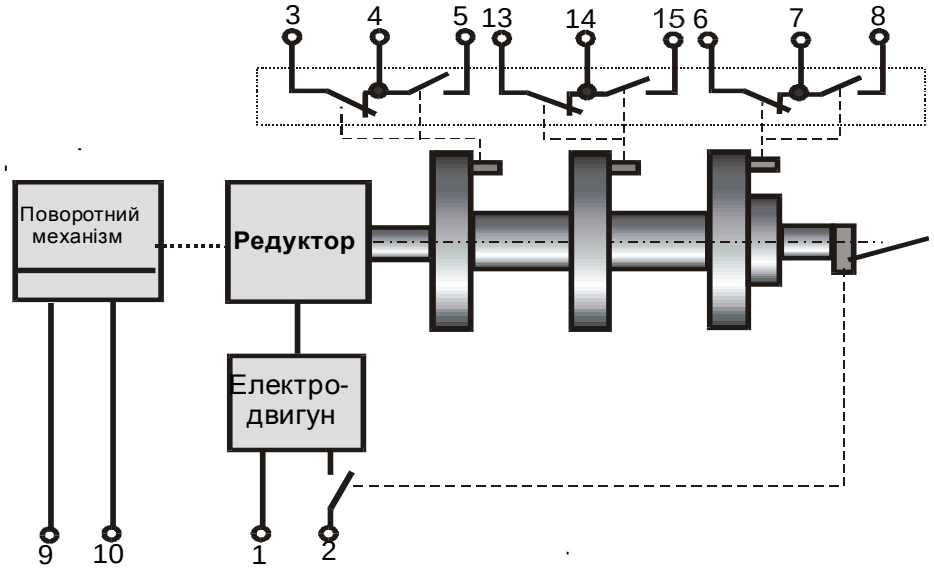


Рис. 11.31 Будова реле ВС-10-31

Реле часу ВЛ-37

Вузол затримки часу даного реле електронний. В основу принципу його дії покладено залежність часу розряджання конденсатора від опору в колі розряджання. При подачі живлення у схему (рис.11.32) відбувається заряджання конденсатора СІ через замкнені контакти реле КV1 і резистор R4.

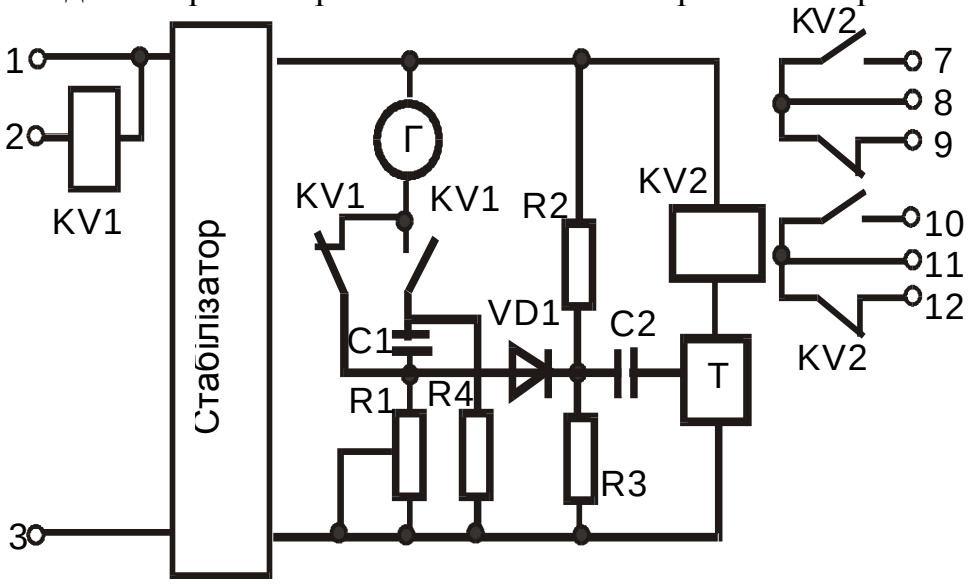


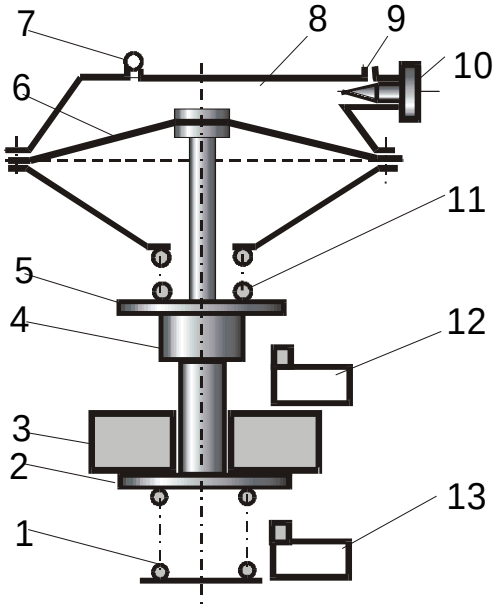
Рис. 11.32 Принципова електрична схема реле ВЛ-37

Після замикання контактних затискачів 2 і 3 спрацьовує вхідне реле KV1, і починається перезаряджання конденсатора CI через резистор R1. Коли напруга на конденсаторі зменшиться до рівня напруги, знятої з подільника на резисторах R2 і R3, відкривається діод VD1. Внаслідок цього імпульси від генератора Г проходять на вхід тригера Т і переводять його в положення, при якому напруга подається на вихідне реле KV2. Воно спрацьовує і перемикає вихідні контакти. При знятті напруги живлення зникає струм в котушці реле KV1, остаточно розряджається конденсатор CI, реле KV2 відпускає.

Затримка часу даного реле становить 0,1 - 10 с. , крок зміни настройки - 0,1 с. Приведена похибка - 1,5%. Напруга живлення -20 В. Регулювання затримки часу відбувається ступінчасто (100 ступенів), шляхом зміни опору R1, виконаного у вигляді набору резисторів.

Реле часу РВП-2

Вузол затримки часу даного реле пневматичний. Принцип дії оснований на залежності часу заповнення повітрям пневматичної камери від перерізу отвору, через який повітря надходить у камеру.



1 - пружина;
2 – колодка;
3 – електромагніт;
4 – якір;
5 – колодка;
6 – мембрана;
7 – клапан;
8 – пневматична камера;
9 – отвір;
10 – регулююча голка;
11 – пружина;
12 – мікроперемикач;
13 - мікроперемикач

Рис. 11.33. Будова реле РВП-2.

Реле складається з електромагнітної системи змінного струму і пневматичної камери. При відсутності струму в котушці реле пружина 1 відтискає якір 4 (рис. 11.33) електромагніта у крайнє верхнє положення. Мембрана при цьому знаходиться в положенні, показаному на рис. 11.33. Контакти мікроперемикачів 12 і 13 знаходяться у визначеному стані (замкнені або розімкнені).

При подачі напруги на котушку 3 якір 4 втягується, стискаючи пружину 11. Однак колодка 5, з'єднана з мембраною 6, швидко опуститись не може, тому що швидкість переміщення мембрани вниз залежить від кількості повітря, яке надходить до камери через отвір 9. Переріз отвору і , відповідно, витримку часу змінюють за допомогою регулюючої голки 10.

Коли колодка 5 з мембраною опускається донизу, вона натискає на штифт мікроперемикача 12 і перемикає його контакти. Після зняття напруги з котушки реле пружина 1 переводить якір у верхнє положення і мембрана 6 швидко повертається у початковий стан. Під час цього здійснюється вихлоп повітря з камери 8 через клапан 7.

Затримка часу, що забезпечує реле, становить 0,4 - 180 с. Приведена похибка - 15%. Напруга живлення - 127 В.

Електромеханічне реле РВ 248

Вузол затримки часу даного реле механічний. Він має годинниковий механізм (рис. 11.34.), який обертає коромисло. При визначеному куті повороту коромисла здійснюється замиканням керуючих контактів реле. Настройка реле на заданий час затримки здійснюється за рахунок повороту сектора з закріпленими на ньому керуючими контактами. Кут повороту сектора встановлюється вручну за шкалою часу.

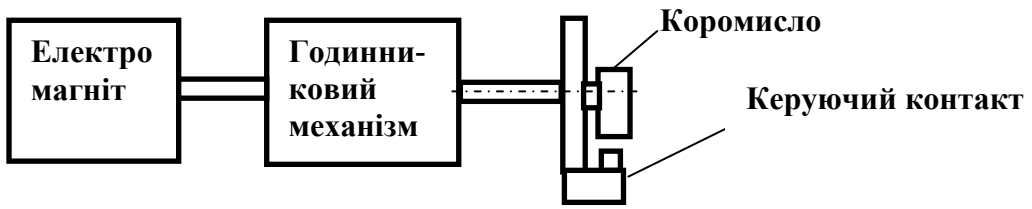


Рис. 11.34. Будова реле РВ 248

При знеструмленні електромагнітного реле його пружина забезпечує встановлення коромисла в нульове положення і фіксацію його в цьому положенні. Після подачі напруги на електромагніт його осердя затягує пружину годинникового механізму, який забезпечує обертання коромисла до тих. пір, поки воно не викличе спрацювання керуючого контакту.

Будова лабораторної установки

Лабораторна установка складається зі змонтованих на панелі двох реле часу РВП 2 та РВ 248. Для вимірювання затримки часу реле використовується секундомір. Управління вимиканням секундоміра при спрацюванні реле виконується вихідними контактами, реле [21].

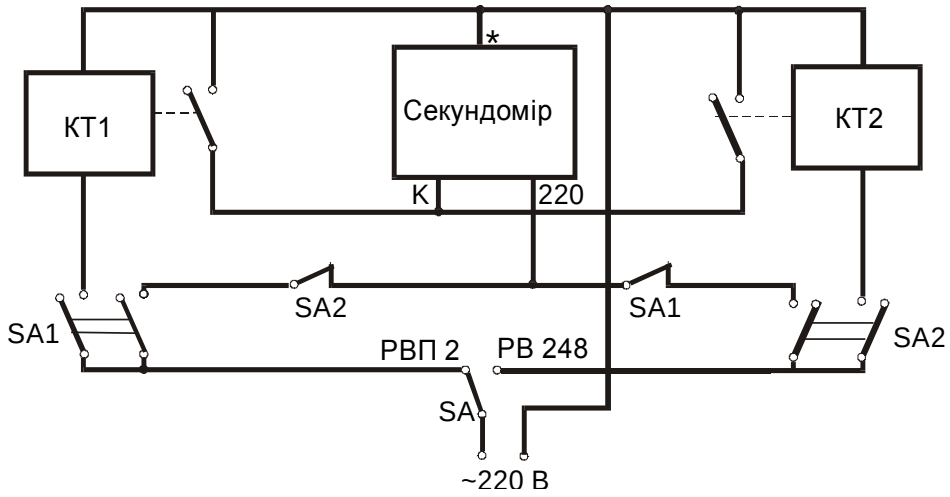


Рис. 11.35. Принципова електрична схема лабораторної установки

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з призначенням, будовою і принципом дії перелічених реле часу.
2. Записати технічні характеристики реле та вимірювальних приладів, що використовуються в даній роботі.
3. Перевести перемикач SA в ліве положення для підключення до секундоміра реле РВП-2.
4. Ввімкнути лабораторну установку.
5. Скинути покази секундоміра і перевірити час спрацювання реле при замиканні контактів вимикача SA1.
6. Обертаючи регулювальний гвинт, настроїти реле на заданий викладачем час спрацювання $t_{СПР\ 0}$ (вважати реле настроєним при відхиленні дійсного часу спрацювання $t_{СПР}$ від заданого $t_{СПР\ 0}$ не більше, як 0,05 с).
7. Виміряти час спрацювання реле 10 разів. Результати занести до таблиці 11.11.

Таблиця 11.11

Результати вимірювання часу спрацювання реле РВП-2

№ вимірювання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Час спрацювання										

8. Визначити середній час спрацювання $t_{СР\ СПР}$ та відносну похибку часу спрацювання δ реле за формулою :

$$\delta = \frac{t_0 - t_{ср\ спр}}{t_{спр\ 0}} \cdot 100\%.$$

9. Якщо відносна похибка часу спрацювання реле перевищує 15%, повторити пункти 6, 7, 8 даного розділу.
10. Аналогічне вимірювання часу спрацювання провести для реле РВ 248.
11. Зробити висновки по роботі.

12.Відповісти на контрольні запитання.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- назву та мету роботи;
- технічні характеристики розглянутих реле часу та вимірювальних приладів, що використовувались у даній роботі;
- електричну схему лабораторної установки;
- таблицю з результатами вимірювань;
- висновки по роботі з аналізом результатів настройки реле РВП-2 і РВ 248, та причин, що можуть впливати на похибку спрацювання реле;
- відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Призначення реле часу.
2. Що є вхідним і вихідним сигналами реле часу як функціонального елемента автоматики?
3. Основні складові реле часу.
4. Основні типи реле часу, які використовуються в сільськогосподарському виробництві.
5. Принцип дії електромеханічних реле часу.
6. Принцип дії електронних реле часу.
7. Принцип дії механічних реле часу.
8. Принцип дії пневматичних реле часу.

РОЗДІЛ 12
ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ З ВИВЧЕННЯ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Практичне заняття № 1

Вивчення статичних та динамічних характеристик первинних вимірювальних перетворювачів температури

Об'єкти вивчення:

- термоелектричні перетворювачі температури;
- термоперетворювачі опору.

Мета заняття:

- закріплення, розширення й поглиблення теоретичних знань про перетворювачі температури;
- вивчення характеристик приладів для вимірювання температури і первинних вимірювальних перетворювачів температури.

Завдання на практичне заняття

Щодо свого варіанту (табл. 12.1):

1. Вивчити теоретичні основи фізичної і конструктивної побудови перетворювачів температури.

2. Визначити для термоперетворювача опору мідного (ТОМ), що застосовується в діапазоні температур −10...+200 °C відношення опору для температури 100 °C до опору для 0°C − W_{100}.

3. Побудувати графік номінальної статичної характеристики (НСХ) ТОМ і визначити його коефіцієнт передачі.

4. При заданій теплової інерційності ТОМ отримати його передатну функцію.

5. Виконати завдання, оформити звіт про виконану роботу на папері у вигляді читацького тексту, подати його викладачу. Захистити роботу.

Звіт з практичного заняття виконується у вигляді зв'язного (читаного) тексту у файлі формату Microsoft Word (шрифт основного текста Times New Roman, 12 пунктів, через 1,5 інтервалу, вирівнювання по ширині).

Він повинен включати:

− назву учбової дисципліни, номер і назву практичного заняття;
− об'єкти вивчення і мету заняття;
− прізвище і ініціали автора, номер групи;
− прізвище і ініціали викладача;

− номер варіанту;

− результати обчислень, графіки, висновки, відповіді на питання.

Під виконаною роботою ставляться підписи її авторів.

Варіанти завдань на практичне заняття наведено у табл. 12.1. Варіант завдання відповідає номеру студента за списком навчальної групи.

Таблиця 12.1.

Варіанти завдань на практичне заняття

Варіант	Термоперетворювач опору ТОМ50М			Варіант	Термоперетворювач опору ТОМ100М		
	T_0°	T	τ		T_0°	T	τ
1	0	4	1	11	0	4	1
2	1	5	2	12	1	5	2
3	2	7	3	13	2	7	3
4	3	9	4	14	3	9	4
5	4	20	8	15	4	20	8
6	5	30	10	16	5	30	10
7	6	40	12	17	6	40	12
8	7	50	14	18	7	50	14
9	8	60	16	19	8	60	16
10	9	80	18	20	9	80	18

Примітка. T_0° − температура термоперетворювача опору, при якій визначається відношення $W_{100} = R_{100}/R_0$.

Теоретичні відомості

Температуру вимірюють контактним або безконтактним методами.

При контактному методі вимірювання вимірювальний перетворювач (датчик) температури контактує з об'єктом вимірювання і набуває його температури. Застосування контактного методу обмежене жаростійкістю і хімічною стійкістю матеріалу датчика температури.

У контактних вимірювальних перетворювачах температури використовують три групи термочутливих елементів: термоелементи розширення, в яких зміна температури перетвориться в розширення твердих тіл, рідин або газів; манометричні термосистеми, дія яких заснована на залежності тиску речовини в замкнутому об'ємі від температури; перетворювачі температури в зміну електричних параметрів (опір, ЕРС і т. д.).

Існують прилади для вимірювання температури безконтактним способом (пірометричний). Високі температури вимірюють оптичними пірометрами. Принцип їх дії заснований на вимірюванні довжини хвилі теплового випромінювання контрольованого об'єкту.

Безконтактний метод вимірювання температури не має поки виробничого застосування в сільськогосподарській практиці.

Характеристики основних видів приладів для вимірювання температури приведені в табл. 12.2.

Таблиця 12.2.

Характеристики приладів для вимірювання температури

Принцип дії	Назва приладу	Межі вимірювань, °С	
		нижня	верхня
1	2	3	4
Теплове розширювання рідинної речовини	Термометри розширювання зі скляною оболочкою: ртутні; заповнені органичною речовиною	 −35 −196	 600 + 150
Теплове розширювання газів, що визначаєтиься за зміною їх тиску в замкненому об’ємі при зміні температури	Термометри манометричні: рідинні; ртутні; газові; парорідинні	 −120 −35 −120 −60	 600 600 600 300
Зміна електричного опору провідника або напівпровідника при зміні температури	Термометри опору: платинові; мідні;	 −260 −50	 +1300 +180
Виникнення контактного потенціалу між двома різнорідними провідниками при різниці температур «холодних» і «горячих» кінців термопари	Термопари: платинородий− платинові; платинородий−платинородиєві; хромель−алюмелиєві; хромель−копелиєві; мідь−константанові; напівпроводникові	 −20 300 −50 −50 −100 1000	 1300 1600 1000 600 400 2600
Функціональна залежність між променевою енергією, що випромінюється тілом, і його температурою	Пірометри випромнюівання: радіаційні; яскраві; кольорові;	 20 500 600	 3000 4000 2800

Термоперетворювачі опору. Принцип дії термоперетворювачів опору (на практиці поширена назва *термометри опору* (ТО)) ґрунтується на властивості провідників чи напівпровідників змінювати електричний опір у разі змінення температури. Цю залежність характеризує температурний коефіцієнт опору (ТКО). Для перетворень температури використовують матеріали, які мають високу стабільність температурного коефіцієнта опору, високу відтворюваність електричного опору для цієї температури, значний питомий електричний опір і високий ТКО, стабільність хімічних і фізичних властивостей під час нагрівання, інертність до дії досліджуваного середовища.

Чутливий елемент (ЧЕ) ТО може бути виконано з металів і напівпровідників. Вітчизняна промисловість випускає стандартні металеві термометри опору, чутливий елемент яких може бути виготовлено з міді,

платини, нікелю, вольфраму, молібдену, танталу і ніобію. У технічній документації прийнято скорочене позначення термометрів опору по перших літерах: термометр опору мідний (ТОМ), термометр опору платиновий (ТОП), термометр опору нікелевий (ТОН).

Провідникові (***металеві***) ***ТО.*** Конструкцію металевого термометра опору наведено на рис. 12.1. Термометр має чутливий елемент 9, поміщений в кожух 7. Чутливий елемент за допомогою вивідних провідників, які проходять через фарфорові ізолятори (намистини) 10, сполучений із затисками контактної клеми 5.

Вільний простір трубки заповнений порошком окислу алюмінію 8, який покращує теплообмін між чутливим елементом і стінками трубки, закритою герметиком 6. Контактні клеми 5 закріплені в корпусі головки термометра, що містить штуцер для кабелю зовнішніх з'єднань 1 з втулкою ущільнювача і затискною гайкою. Корпус головки закритий кришкою 4, ущільненою прокладкою 3. На об'єкті термометр вмонтовують при допомозі штуцера з гайкою 11.

Матеріал ЧЕ ТО має бути дуже чутливим до змінювання температури.

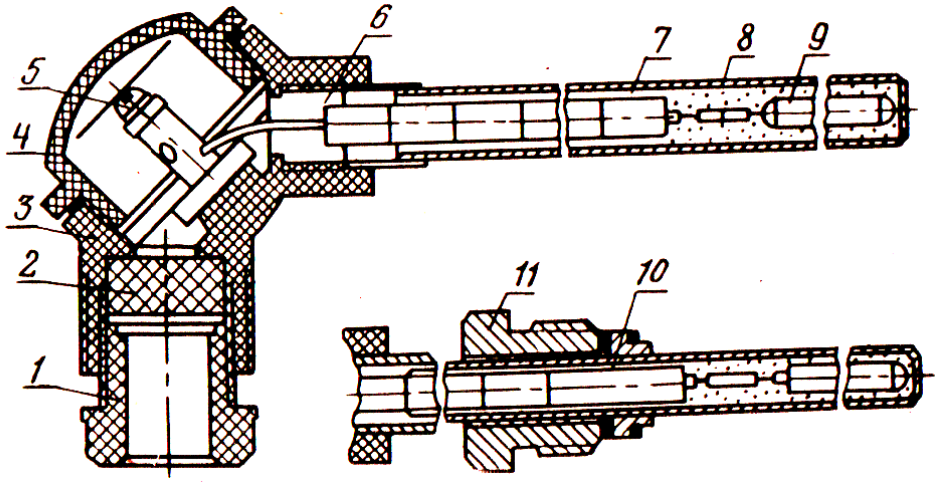


Рисунок 12.1. Конструкція металевого термометра опору:
1 − штуцер під кабель; 2 − прокладка; 3 − корпусу головки; 4 − кришка; 5 − контактна клема; 6 − герметик; 7 − кожух; 8 − окисел алюмінію; 9 − чутливий елемент; 10 − ізолятори; 11 − штуцер для кріплення

Він характеризується ТКО, який показує величину приросту опору у разі змінювання температури ТО на один градус. Робочий струм у ЧЕ не перевищує 10... 15 мА. Тепло, яке при цьому виділяється, дуже мале й майже не впливає на точність вимірювання. Термоперетворювачі опору дозволяють надійно вимірювати температуру в межах мінус 260...+ 1100 °С. Біфілярна (подвійно−зустрічна) намотка провідника дозволяє компенсувати індуктивну складову опору.

Платинові ТО. Із провідникових матеріалів широко застосовують *платину*. Цей благородний метал навіть за високих температур в окисному середовищі не змінює своїх фізичних і хімічних властивостей. Температурний коефіцієнт опору в діапазоні 0...100 °С становить приблизно

1/273 K^{-1}, питомий опір за температури 20 °С – $0{,}105 \cdot 10^{-6}$ Îì · ì, діапазон перетворюваних температур від −260 до +1100 °С.

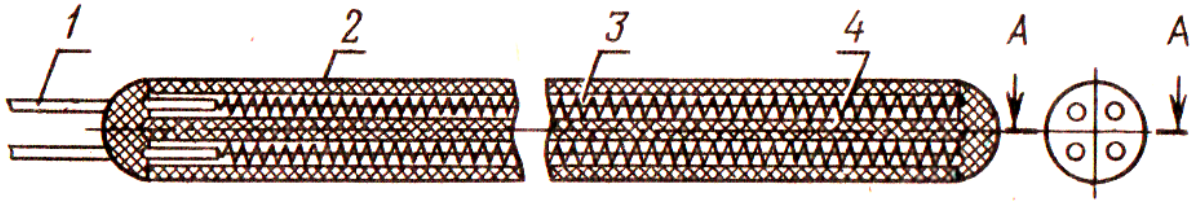


Рис. 12.2. Чутливий елемент:
1 − виводи; 2 − керамічна трубка;
3 − керамічний порошок; 4 − спіраль.

Вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) платинового термометра (рис. 12.2) є платиновою спіраллю 4, поміщену в капілярних керамічних трубках 2, заповнених керамічним порошком 3, який служить ізолятором і володіє інгибіторними (що уповільнюють хімічні реакції) властивостями.

Вади платинових перетворювачів опору: висока вартість платини, досить висока забруднюваність її за високих температур парами металів (особливо заліза), порівняно невисока хімічна стійкість у відновному середовищі, унаслідок чого вона стає крихкою і втрачає стабільність характеристик, а також нелінійність функції $R_{T^\circ} = f(T^\circ)$.

Мідні ТО. Мідь завдяки низькій вартості і досить високій стійкості до корозії, широко застосовують у перетворювачах температури в діапазоні −200...+200 °С. Температурний коефіцієнт опору міді α_t = 1/234,7 K^{-1}, залежність електричного опору від температури – лінійна, тобто:

для мідного ТО з W_{100} = 1,4280:

$W_{T^\circ} = 1 + A(T^\circ - 13{,}7) -$ для діапазону температур −200...−185 $^\circ C$;

$W_{T^\circ} = 1 + \alpha T^\circ + B(T^\circ - 10) + CT^{\circ 3} -$ для діапазону температур −185...−100 $^\circ C$;

$W_{T^\circ} = 1 + \alpha T^\circ + BT^\circ(T^\circ - 10) -$ для діапазону температур −100...−10 $^\circ C$;

$W_{T^\circ} = 1 + \alpha T^\circ -$ для діапазону температур −10...+200 $^\circ C$,

де W_{T° − відношення опорів для температури T° до опору для $0\,^\circ C$;

$\alpha = 4{,}28 \cdot 10^{-3}\ ^\circ C^{-1}$; $A = 4{,}2775 \cdot 10^{-3}\ ^\circ C^{-1}$; $B = -5{,}4136 \cdot 10^{-7}\ ^\circ C^{-1}$;

$C = 9{,}8265 \cdot 10^{-10}\ ^\circ C^{-1}$; (*)

для мідного ТО з W_{100} = 1,4260:

$W_{T^\circ} = 1 + \alpha T^\circ -$ для діапазону температур −50...+200 $^\circ C$,

де $\alpha = 4{,}26 \cdot 10^{-3}\ ^\circ C^{-1}$.

У мідних термометрах вимірювальний перетворювач є безкаркасною безіндукційною (біфілярне намотування) обмоткою з мідного дроту, покритою плівкою фторопласта. До обмоток припаюють виводи з дроту більшого перетину. Перетворювачі поміщають в тонкостінну металеву гільзу.

Головною вадою мідних ТО вважають високу окиснюваність під час вимірювання, через що їх застосовують у порівняно вузькому діапазоні температур у середовищах з низькою вологістю та безагресивних газів.

Крім платини та міді, для ЧЕ ТО використовують ***нікель*** − хімічно стійкий матеріал навіть за високих температур, проте має складну залежність опору від температури і невисоку її відтворюваність.

Чутливість термоперетворювачів опору визначається наступними співінтерполяційними співвідношеннями:

Платинові ТО:

$\frac{dR_{T^\circ}}{dT^\circ} = R_0[A + 2BT^\circ + 4CT^{\circ 2}(T^\circ - 75)]-$ для діапазону температур −200...0 $^\circ C$;

$\frac{dR_{T^\circ}}{dT^\circ} = R_0(A + 2BT^\circ)-$ для діапазону температур −200...0 $^\circ C$;

Мідні ТО з W_{100} = 1,4280:

$\frac{dR_{T^\circ}}{dT^\circ} = AR_0 -$ для діапазону температур −200...−185 $^\circ C$;

$\frac{dR_{T^\circ}}{dT^\circ} = (\alpha + 2BT^\circ - 10B + 3CT^{\circ 2})R_0 -$ для діапазону температур −185...−100 $^\circ C$;

$\frac{dR_{T^\circ}}{dT^\circ} = (\alpha + 2BT^\circ - 10B)R_0 -$ для діапазону температур −100...−10 $^\circ C$;

$\frac{dR_{T^\circ}}{dT^\circ} = \alpha R_0 -$ для діапазону температур −10...+200 $^\circ C$.

Мідні ТО з W_{100} = 1,4260:

$$\frac{dR_{T^\circ}}{dT^\circ} = \alpha R_0.$$

Значення коефіцієнтів A, B, C, α встановлюють відповідно до рядку (*).

Значення ΔR_{T° можна визначити також за рівнянням

$$\Delta R_{T^\circ} = \frac{\Delta T^\circ \Delta R}{\Delta T_1^\circ},$$

де $\Delta R -$ приріст опору в околі точки T°; $\Delta T_1^\circ -$ розмах околу.

Нікелеві ТО:

$\frac{dR_{T^\circ}}{dT^\circ} = R_0(A + 2BT^\circ) -$ для діапазону температур −60...+100 $^\circ \tilde{N}$;

$\frac{dR_{T^\circ}}{dT^\circ} = R_0[A + BT^\circ + CT^\circ(3T^\circ - 200)] -$ для діапазону температур −100...+180 $^\circ C$.

Номінальні статичні характеристики (НСХ) перетворення ТО визначають за рівнянням

$$R_{T^\circ} = R_0 W_{T^\circ}, \qquad (12.1)$$

де $R_{T°}$, R_0 − опори ТО для температур $T°$ і 0 °C, Ом; $W_{T°}$ − відношення опорів для температури $T°$ до опору для 0 °C. Значення $W_{T°}$ для різних ТО у певних діапазонах температури визначають з відповідних інтерполяційних рівнянь, наведених у ДСТУ 2858-94 (див. вище).

Умовні позначення номінальних статичних характеристик (НСХ) термоперетворювачів опору. Залежно від номінального значення опору за температури 0 °C (R_0) і номінального значення відношення опорів W_{100} =

= R_{100} / R_0 умовне позначення НСХ перетворення ТО має відповідати наведеному у табл. 12.3.

Таблиця 12.3.

Умовні позначення НСХ перетворення ТО

Тип ТО	Номінальне значення R_0, Ом	Умовне позначення НСХ перетворення ТО		
		українське	міжнародне	
Платиновий (ТОП)		W_{100} = 1,3850		W_{100} = 1,3910
	1	1П	Pt 1	Pt` 1
	10	10П	Pt 10	Pt` 10
	50	50П	Pt 50	Pt` 50
	100	100П	Pt 100	Pt` 100
	500	500П	Pt 500	Pt` 500
Мідний (ТОМ)		W_{100} = 1,4260		W_{100} = 1,4280
	10	10М	Cu 10	Cu` 10
	50	50М	Cu 50	Cu` 50
	100	100М	Cu 100	Cu` 100
Нікелевий (ТОН)	100	100Н	Ні 100	

Основні характеристики термоперетворювачів опору. Основні характеристики ТО мають відповідати вимогам, поданим у табл. 12.4.

Таблиця 12.4.

Характеристики стандартних типів ТО

Назва характеристики	Тип ТО		
	Платинові (ТОП)	Мідні (ТОМ)	Нікелеві (ТОН)
Діапазон вимірюваних температур, $^{\circ}C$	−260...+850 (+1100 – для одиничного виробництва)	−200...+200	−60...+180
Клас допуску	Межа допустимого відхилення опору від НСХ для класів допуску, $^{\circ}C$		
A	$\pm\left(0{,}15+0{,}002\left\|T^{\circ}\right\|\right)$ від −220 до +850 $^{\circ}C$	$\pm\left(0{,}15+0{,}002\left\|T^{\circ}\right\|\right)$ від −50 до +120 $^{\circ}C$	
B	$\pm\left(0{,}3+0{,}005\left\|T^{\circ}\right\|\right)$ від −220 до +1100 $^{\circ}C$	$\pm\left(0{,}25+0{,}0035\left\|T^{\circ}\right\|\right)$ від −200 до +200 $^{\circ}C$	
C	$\pm\left(0{,}6+0{,}008\left\|T^{\circ}\right\|\right)$ від −100 до +300 $^{\circ}C$, від 850 до +1100 $^{\circ}C$,	$\pm\left(0{,}5+0{,}0065\left\|T^{\circ}\right\|\right)$ від −200 до +200 $^{\circ}C$	$\pm\left(0{,}3+0{,}0165\left\|T^{\circ}\right\|\right)$ від −60 до 0 $^{\circ}C$; $\pm\left(0{,}3+0{,}008\left\|T^{\circ}\right\|\right)$ від 0 до +180 $^{\circ}C$

Залежність відношення опорів W_{T° від температури для мідних ТО з W_{100} = 1,428 наведено у табл. 12.5.

Таблиця 12.5.

Залежність відношення опорів W_{T° від температури

Температура, °С	Відношення опорів для температури, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	7	8	10	11
−200	0,1217	–	–	–	–	–	–	–	–	–
−190	0,1628	0,1586	0,1545	0,1504	0,1463	0,1422	0,1381	0,1340	0,1299	0,1258
−180	0,2058	0,2012	0,1966	0,1921	0,1875	0,1833	0,1792	0,1751	0,1710	0,1669
−170	0,2514	0,2469	0,2514	0,2378	0,2332	0,2286	0,2241	0,2195	0,2149	0,2104
−160	0,2968	0,2923	0,2878	0,2832	0,2787	0,2742	0,2696	0,2651	0,2605	0,2560
−150	0,3421	0,3375	0,3330	0,3285	0,3240	0,3195	0,3150	0,3104	0,3059	0,3014
−140	0,3871	0,3826	0,3781	0,3736	0,3691	0,3646	0,3601	0,3556	0,3511	0,3466
−130	0,4319	0,4274	0,4230	0,4185	0,4140	0,4095	0,4050	0,4005	0,3961	0,3916
−120	0,4766	0,4721	0,4676	0,4632	0,4587	0,4543	0,4498	0,4453	0,4409	0,4364
−110	0,5210	0,5166	0,5121	0,5077	0,5033	0,4988	0,4944	0,4899	0,4855	0,4810
−100	0,5653	0,5609	0,5565	0,5520	0,5476	0,5432	0,5388	0,5343	0,5299	0,5255
−90	0,6101	0,6058	0,6014	0,5970	0,5926	0,5882	0,5838	0,5795	0,5731	0,5707
−80	0,6539	0,6495	0,6452	0,6408	0,6364	0,6320	0,6277	0,6233	0,6189	0,6145
−70	0,6975	0,6932	0,6888	0,6845	0,6801	0,6757	0,6714	0,6670	0,6626	0,6583
−60	0,7411	0,7367	0,7324	0,7280	0,7237	0,7193	0,7150	0,7106	0,7063	0,7019
−50	0,7845	0,7802	0,7758	0,7715	0,7671	0,7628	0,7585	0,7541	0,7498	0,7454
−40	0,8278	0,8235	0,8192	0,8148	0,8105	0,8062	0,8018	0,7925	0,7932	0,7888
−30	0,8710	0,8667	0,8624	0,8581	0,8538	0,8494	0,8451	0,8408	0,8365	0,8321
−20	0,9141	0,9098	0,9055	0,9012	0,8969	0,8926	0,8883	0,8840	0,8797	0,8753
−10	0,9571	0,9528	0,9485	0,9442	0,9399	0,9356	0,9313	0,9270	0,9227	0,9184
0	1,0000	0,9957	0,9914	0,9872	0,9829	0,9786	0,9743	0,9701	0,9658	0,9615
0	1,0000	1,0043	1,0086	1,0128	1,0171	1,0214	1,0257	1,0299	1,0342	1,0385
10	1,0428	1,0471	1,0513	1,0556	1,0599	1,0642	1,0684	1,0727	1,0770	1,0813
20	1,0856	1,0898	1,0941	1,0984	1,1027	1,1069	1,1112	1,1155	1,1198	1,1240
30	1,1283	1,1326	1,1369	1,1412	1,1454	1,1497	1,1540	1,1583	1,1625	1,1668
40	1,1711	1,1754	1,1797	1,1839	1,1882	1,1925	1,1968	1,2010	1,2053	1,2096
50	1,2139	1,2182	1,2224	1,2267	1,2310	1,2353	1,2395	1,2438	1,2481	1,2524
60	1,2567	1,2609	1,2652	1,2695	1,2738	1,2780	1,2823	1,2866	1,2909	1,2952
70	1,2994	1,3037	1,3080	1,3123	1,3165	1,3208	1,3251	1,3294	1,3336	1,3379
80	1,3422	1,3465	1,3510	1,3552	1,3593	1,3636	1,3679	1,3721	1,3764	1,3807
90	1,3850	1,3893	1,3935	1,3978	1,4021	1,4064	1,4106	1,4149	1,4192	1,4235
100	1,4278	1,4320	1,4363	1,4406	1,4449	1,4491	1,4534	1,4577	1,4620	1,4663
110	1,4705	1,4748	1,4791	1,4834	1,4876	1,4919	1,4962	1,5005	1,5048	1,5090
120	1,5133	1,5176	1,5219	1,5261	1,5304	1,5347	1,5390	1,5432	1,5475	1,5518
130	1,5561	1,5604	1,5646	1,5689	1,5732	1,5775	1,5817	1,5860	1,5903	1,5946
140	1,5989	1,6031	1,6074	1,6117	1,6160	1,6202	1,6245	1,6288	1,6331	1,6374
150	1,6416	1,6459	1,6502	1,6545	1,6587	1,6630	1,6673	1,6716	1,6759	1,6801
160	1,6844	1,6887	1,6930	1,6972	1,7015	1,7058	1,7101	1,7144	1,7186	1,7229
170	1,7272	1,7315	1,7357	1,7400	1,7443	1,7486	1,7528	1,7571	1,7614	1,7657
180	1,7700	1,7742	1,7785	1,7828	1,7871	1,7913	1,7956	1,7999	1,8042	1,8085
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
190	1,8127	1,8170	1,8213	1,8256	1,8298	1,8341	1,8384	1,8427	1,8470	1,8512
200	1,855	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Тугоплавкі метали – вольфрам, молібден, тантал і ніобій – застосовують обмежено. Вплив рекристалізації та росту зерен в результаті дії температури

робить термочутливий елемент з цих матеріалів крихким і тому дуже чутливим до механічних вібрацій.

Сплави з вищим питомим електричним опором порівняно з чистими металами як матеріали ЧЕ ТО не застосовують через порівняно низький ТКО, значення якого значною мірою залежить від кількісного та якісного складу домішок. Потрібно також відзначити, що незначна кількість домішок у чистих металах майже не змінює характеру залежності їх опору від температури.

Термоперетворювачі опору з плівковими ЧЕ з металевої фольги, розміщеної на ізолювальній підкладці, не так поширені, як провідникові, хоча сфера їх застосування постійно розширюється, оскільки вони мають малі габарити, кращі динамічні властивості, вищу чутливість і відповідно невисоку вартість.

Термоелектричні перетворювачі
Загальні відомості

Основу будь−якого термоперетворювача (ТП) становить термопара, утворена двома провідниками *A* і *B,* два з'єднання (спаї) яких мають різні температури (T_1° і T_2°). Це зумовлює появу на виході термопари ЕРС $E_{AB}(\Delta T°)$, де $\Delta T^\circ = T_2^\circ - T_1^\circ$, залежну, з одного боку, від матеріалу провідників *A і B,* з другого боку − від температур T_1° і T_2° (її називають термо−ЕРС).

Ось як подає терміни *термопара* і *термоелектричний перетворювач* ДСТУ 3307-96 «Перетворювачі термоелектричні. Подовжувальні та компенсаційні проводи. Допуски та система ідентифікації»: ***термопара*** − два провідники з різних матеріалів, які з'єднані на одному кінці й утворюють частину пристрою, що використовує для вимірювання температури термоелектричний ефект; ***термоелектричний перетворювач*** − термоперетворювач, який містить термопару і дія якого ґрунтується на використанні термо−ЕРС термопари від температури. У практиці вимірювань ці терміни зазвичай використовують як синоніми, традиційно віддаючи перевагу застосуванню першого; використовується також назва ***термоелектричний термометр.***

Зазвичай температура одного спаю T_1° (його називають «холодним») постійна й відома; вона слугує опорною (нульовою) точкою й позначається через T_0°.

Температура другого спаю T_2° (його називають «гарячим» або робочим) − це температура, якої набуває цей спай у досліджуваному середовищі з температурою T°, що підлягає вимірюванню. Оскільки вимірювальна інформація надходить від спаю, розміри якого можуть бути дуже малими, це забезпечує високу швидкодію й дозволяє проводити точкові вимірювання температури.

Зазначені дві особливості визначають перевагу застосування термопар порівняно з ТО. Інша перевага термопари полягає у вироблюваному сигналі − термо−ЕРС, для вимірювання якого немає потреби пропускати струм через термоелемент, а тому не виникає, як у випадку з ТО, похибки, пов'язаної із саморозігрівом, що істотно для вимірювань у системах з малою тепловою інерцією, а також у разі вимірювання низьких температур.

Недолік термопари − для вимірювання належить знати температуру опорного спаю. Будь-яка похибка дотримання $T_0^\circ = 0$ °С спричиняє таку ж похибку визначення вимірюваної температури T°.

Термоелектричні явища, що відбуваються в металевих або напівпровідникових колах, показують, що в них, крім ефекту Джоуля, відбувається перетворення енергії теплового руху в електричну енергію рухомих зарядів.

Ефект Пельтьє. У з'єднанні двох різних провідників *A* і *B* з однаковою температурою *T*° (рис. 12.3, *а*) установлюється різниця потенціалів, називана ЕРС Пельтьє $P_{AB}(T°)$, що залежить тільки від природи провідників і їх температури:

$$U_M - U_N = P_{AB}(T°).$$

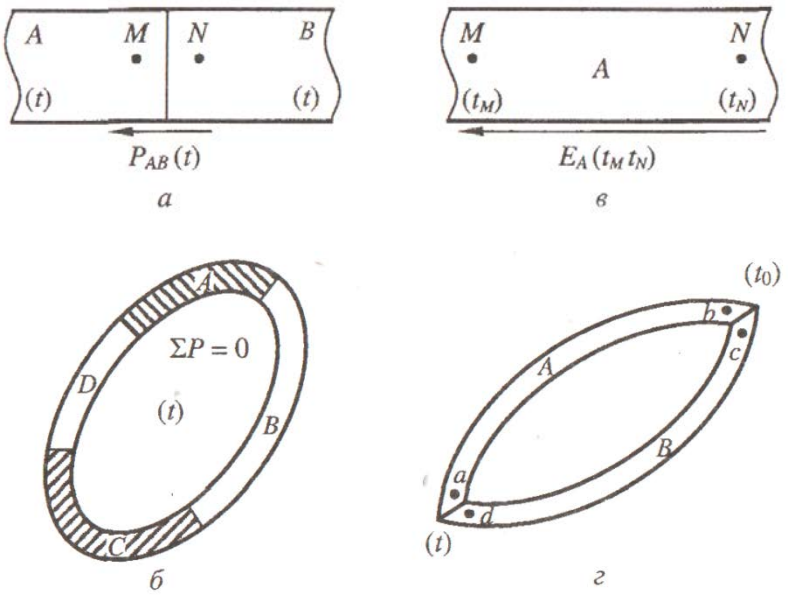


Рис. 12.3. Термоелектричні ефекти:
Пельтьє(*а*), Томсона (в), Зеебека (*г*)
і закон Вольта (*б*)

Відповідно до закону Вольта, в ізотермічному замкненому колі, складеному з різних провідників, сума ЕРС Пельтьє дорівнює нулю. Звідси для кола, що складається з металевих провідників *A, B, C, D* (рис. 12.3, б),

$$E_{AB}(T^\circ) + E_{BC}(T^\circ) + E_{CD}(T^\circ) + E_{DA}(T^\circ) = 0.$$

Інакше в замкненому контурі мали б виникати струм і дисипація енергії внаслідок ефекту Джоуля, що суперечило б теоремі Карно, відповідно до якої система з постійною температурою не може бути джерелом енергії.

Попереднє співвідношення можна записати також у вигляді

$$E_{AB}(T^\circ) + E_{BC}(T^\circ) + E_{CD}(T^\circ) + = -E_{DA}(T^\circ)$$

або

$$E_{AB}(T^\circ) + E_{BC}(T^\circ) + E_{CD}(T^\circ) = E_{AD}(T^\circ),$$

оскільки $E_{AD}(T^\circ) = -E_{DA}(T°)$. Звідси випливає, що коли два провідники *A* і *D*) з'єднані проміжними провідниками, то в ізотермічному колі різниця потенціалів між крайніми провідниками *A* і *D* буде такою ж, як і за безпосереднього з'єднання цих провідників.

Ефект Томсона. Між двома точками *M* і *N* однорідного провідника *A* (рис. 12.3, *в*) з різними температурами виникає ЕРС (її називають ЕРС Томсона), що залежить тільки від природи провідника й температур T_M° і T_N° :

$$E_A(\Delta T^\circ) = \int_{T_N^\circ}^{T_M^\circ} h_A dT^\circ,$$

де h_A - залежний від температури коефіцієнт Томсона для провідника *A*; $\Delta T^\circ = T_M^\circ - T_N^\circ$.

Закон Магнуса говорить, що якщо кінці кола виготовлені з того самого провідника й мають однакову температуру, то ЕРС Томсона дорівнює нулю.

Ефект Зеебека. Розглянемо замкнене коло, що складається із двох провідників *A* і *B,* спаї яких мають температури *T*° і T_0°. Ці провідники утворюють термопару (рис. 12.3, *г*). У термопарі виникає так звана ЕРС Зеебека $E_{AB}(T°)$, де $\Delta T^\circ = T^\circ - T_0^\circ$, яка є результатом ефектів Пельтьє й Томсона в цьому колі. Дійсно, ЕРС між точками *a* та *Ь* дорівнює $e_{ab} = \int_{T_0^\circ}^{T^\circ} h_A dT^\circ$; ЕРС між точками *b* і с дорівнює $e_{bc} = E_{AB}(T_0^\circ)$; ЕРС між точками *c* і *d* визначається інтегралом $e_{cd} = \int_{T_0^\circ}^{T^\circ} h_B dT^\circ$; ЕРС між точками *d* і *a* $e_{da} = E_{BA}(T_0^\circ)$. Загальна ЕРС, яка дорівнює сумі наведених ЕРС, являє собою ЕРС Зеебека:

$$E_{AB}(\Delta T^\circ) = E_{AB}(T^\circ) - E_{AB}(T_0^\circ) + \int_{T_0^\circ}^{T^\circ} (h_A - h_B) dT^\circ.$$

Якщо за одну з температур, наприклад T_0°, узяти деяку певну початкову температуру (наприклад, 0 °С), то ЕРС пари провідників *A* та *B* буде залежати тільки від *T*°.

Відкрите у 1821 р. Зеебеком явище термоелектричного ефекту (ефект Зеебека) лежить в основі принципу дії термопари: якщо в замкненому

контурі, утвореному двома провідниками (термоелектродами) *A* та *B* (див. рис. 12.3, *г*), виготовленими з різних металів чи сплавів, місця їх з'єднання матимуть різну температуру, то в такому контурі проходитиме електричний струм. Якщо до такого кола ззовні подається струм, то один зі спаїв буде нагріватися, а другий охолоджуватись − залежно від напряму проходження струму (ефект Пельтьє).

У разі розмикання такого кола на його кінцях виникає термо−ЕРС (її можна виміряти), величина та напрям якої залежать від матеріалу термоелектродів *A* та *B* і від різниці температур у спаях (чим вона більша, тим більша й термо−ЕРС). Робочий кінець (гарячий спай) ТП створюють спаюванням або зварюванням термоелектродів, вільні кінці яких (холодний спай) приєднують за допомогою з'єднувальних проводів до електричного кола системи керування або до вимірювальних приладів.

Напрям струму залежить від співвідношення температур спаїв, тобто якщо $T° > T_0^\circ$, то струм буде проходити в одному напрямі, якщо $T° < T_0^\circ$, − то в протилежному. Один термоелектрод, від якого у спаї з меншою температурою струм проходить до другого термоелектрода, вважають позитивним (у позначеннях термопар і в індексах термо−ЕРС його записують першим), а другий − негативним. Наприклад, якщо $T_0^\circ < T°$ (рис. 12.3, *г*) і струм у спаї з температурою T_0° напрямлений від термоелектрода *A* до термоелектрода *B,* то термоелектрод *A* буде термопозитивним, а *B* – термонегативним.

За законом Вольта в замкненому колі, утвореному двома різнорідними провідниками *A* та *B* (рис. 12.3, *г*), коли температури місць їх з'єднання однакові ($T_0^\circ = T°$) і немає сторонніх ЕРС, термострум не виникає. Тому контактні (у місцях спаїв) ЕРС однакові за величиною, але протилежні за знаком, а отже, сумарна термо−ЕРС кола дорівнюватиме нулю:

$$E_{AB}(\Delta T°) = e_{AB}(T°) + e_{BA}(T°) = 0. \qquad (12.2)$$

Тоді з рівняння (6) маємо:

$$e_{AB}(T°) = -e_{BA}(T°), \qquad (12.3)$$

тобто, якщо позначення електродів у індексах термо−ЕРС переставити місцями, її знак змінюється на протилежний.

Якщо ж спаї термопари мають різну температуру ($T_0^\circ \neq T°$), то, враховуючи вираз (2.3), з рівняння (2.2) отримуємо *основне рівняння термопари,* що виражає в загальному вигляді залежність сумарної термо−ЕРС, яка виникає в колі з двох різнорідних термоелектродів *A* та *B,* від температур їх спаїв:

$$E_{AB}(\Delta T°) = e_{AB}(T^\circ) - e_{AB}(T_0^\circ) \qquad (12.4)$$

Якщо температуру вільних кінців зафіксувати: $T_0^\circ = \text{const}$, то $e_{AB}(T_0^\circ) = c$, а $E_{AB}(\Delta T°) = e_{AB}(T°) - c = f(T°)$, тобто величина термо−ЕРС ТП буде пропорційною температурі його робочого кінця. Під час градуювання

термопар температуру вільних кінців слід підтримувати сталою (зазвичай T_0° = 0 °С).

Важливо зазначити, що величина термо−ЕРС не залежить від розподілення температури по довжині термоелектродів, а визначається лише різницею температур гарячого спаю та вільних кінців (варто додати, що величина термо−ЕРС визначається хімічним складом термоелектродів термопари і не залежить від їх геометричних розмірів).

Ще однією властивістю термопари (її ще називають законом проміжних металів), яка не залежить від розміру та хімічного складу термоелектродів, є те, що введення третього провідника в коло термопари не змінює сумарної термо−ЕРС, якщо кінці цього провідника мають однакову температуру.

Конструкція та статичні характеристики термоелектричних перетворювачів

У твердій захисній гільзі 4 (рис. 12.4) розміщено термоелектроди 2 термопари з надітими на них ізоляційними бусами 3. Спай торкається дна захисної гільзи 4 або ізолюється від нього за допомогою керамічного наконечника. До вільних кінців 6 термоелектродів у корпусі головки 9 приєднуються подовжувальні або компенсувальні проводи. Захисна гільза 4 з розміщеною в ній термопарою вводиться в об'єкт вимірювання й кріпиться на ньому за допомогою штуцера 11.

Для забезпечення надійного контакту спай 1 виготовляють зварюванням, рідше паянням або скручуванням (для високотемпературних ТП). Захисну гільзу 4 виконують у вигляді циліндричної або конічної трубки з газонепроникних матеріалів діаметром приблизно 15...25 мм і довжиною від 100 до 2500...3500 мм (залежно від потреби об'єкта вимірювання).

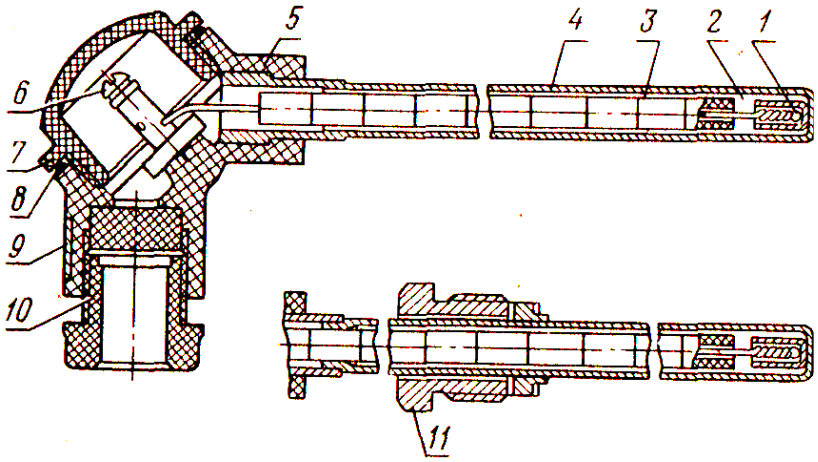


Рис. 12.4. Конструкція термоелектричних термометрів

1 − робочий спай; 2 − термоелектроди; 3 − ізолятори; 4 − захисна гільза; 5 − герметик; 6 − контактний затиск; 7 − кришка; 8 − прокладка; 9 − корпус головки; 10 − штуцер під кабель; 11 − штуцер для кріплення.

Матеріалом для захисної гільзи зазвичай слугують різні сталі. Для вищих температур використовують гільзи з тугоплавких з'єднань, а також кварц і порцеляну. Діаметр термоелектродів становить 2...3 мм, крім термоелектродів платинової групи, діаметр яких 0,1...0,5 мм, що пов'язано з їх високою вартістю.

Стандартні ТП випускають одинарними, подвійними та поверхневими - для вимірювання температури стінок об'єкта, або коли доступ усередину об'єкта ускладнений чи неможливий. Тепер дедалі ширше використовують ТП кабе-льного типу (гнучкі). Термоелектроди цих ТП розміщують у тонкостінній оболонці з високолегованої сталі (зовнішній діаметр оболонки 0,5...6 мм, довжина 10...30 м) й ізолюють від стінок гільзи та один від одного термостійким керамічним порошком.

Номінальні статичні характеристики ТП, тобто залежність між термо-ЕРС і температурою гарячого спаю, визначаються градуюванням ТП, і їх можна зобразити у вигляді графіків (рис. 12.5); наведений вигляд НСХ ТП − якісно− порівняльний, оскільки насправді вони мають незначну нелінійність; тому їх розбивають на окремі лінійні ділянки, що описуються відповідними поліномами), таблиць або аналітичних виразів.

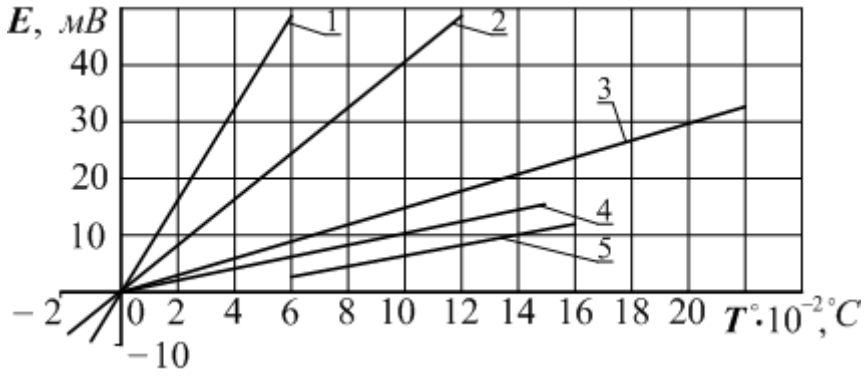


Рис. 12.5. Номінальні статичні характеристики ТП:

1 – хромель-копелевого (НСХ *L*); 2 – хромель-алюмелевого (*K*); 3 – вольфрам реній-вольфрамренієвого (А − 1); 4 – платино родій-платинового (*R* та *S*); 5 – платино родій-платинородієвого (*B*)

До матеріалу термоелектродів ТП ставлять такі вимоги:

стабільність і відновлюваність термоелектричних властивостей;

достатньо велика термо−ЕРС;

стійкість до впливу зовнішніх чинників, зокрема жаростійкість та механічна міцність;

хімічна інертність;

однозначна та лінійна залежність термо−ЕРС від температури;

висока термоелектрична однорідність матеріалу провідників по довжині, що дозволяє відновлювати робочий спай без переградуювання;

технологічність виготовлення, що забезпечує отримання взаємозамінюваних за термоелектричними властивостями матеріалів;

дешевизна.

Вибираючи потрібний тип ТП, слід керуватися не тільки границями вимірювання та граничнодопустимим відхиленням (для деяких ТП їх наведено в табл. 12.4), але й знати особливості поведінки матеріалів (див. табл. 12.6, 12.7), з яких їх виготовлено, у вимірюваному середовищі.

Вольфрамреній−вольфрамренієві термопари (тип ТВР, НСХ *А*−1) використовують для вимірювання температури до 2500 °С у водневих і нейтральних (інертних) середовищах, а також у вакуумі. Такі ТП використовують для вимірювання температури розплавлених металів.

Платинородій−платинородієві термопари (тип ТПР, НСХ *В*) придатні для неперервної роботи в окиснювальних та нейтральних середовищах у температурному діапазоні 600... 1700 °С. Їх також можна використовувати для виконання короткочасних вимірювань у вакуумі. Такі термопари не рекомендується використовувати у водневому середовищі, що містить пари металів і неметалів.

Хромель−константанові термопари (тип ТХКн, НСХ *Е*) рекомендується використовувати в окиснювальних або нейтральних середовищах; у водневих середовищах і вакуумі вони мають такі ж обмеження, що й термопари типу *К*. Термопари типу *Е* можна використовувати для вимірювання від'ємних температур, оскільки вони не піддаються корозії під час роботи в атмосфері з підвищеним умістом вологи. Вони виробляють найбільшу серед усіх відомих типів термопар термо−ЕРС.

Залізоконстантанові термопари (тип ТЗК, НСХ *J*) підходять для роботи у вакуумі, а також у різних середовищах: і нейтральних, і окиснювальних, і водневих. За температури близько 540 °С починається процес окиснення залізних термоелектродів. Термопари типу ТЗК не рекомендується використовувати для температур, що нижчі від температури точки замерзання води через їх крихкість і схильність до іржавіння (у цьому температурному діапазоні краще працюють термопари типу ТМКн).

Хромель−алюмелеві термопари (тип ТХА, НСХ *К*) використовують для вимірювання температури в окиснювальних та повністю нейтральних середовищах; завдяки стійкості до окиснювання їх часто використовують для температур понад 540 °С. Однак ці термопари не слід застосовувати у водневій і сірчаній атмосферах, а також у вакуумі.

Хромель−копелеві термопари (тип ТХК, НСХ *L*) стійко працюють в окиснювальному середовищі, трохи гірше − у водневому.

Платинородій−платинові термопари (типи ТПШ 13 і ТПП 10, НСХ *R* і *S*) призначені для неперервної роботи в нейтральних і окиснювальних середовищах в температурному діапазоні 0.. .1300 °С.

Мідь−константанові термопари (тип ТМКн, НСХ *Т*) корозієстійкі (їх можна використовувати у вологому середовищі) і придатні для вимірювання від'ємних температур.

Динамічні властивості термоелектричних перетворювачів (ТП) і термометрів опору (ТО) можна описувати передавальною функцією

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-\tau \cdot s}, \qquad (12.5)$$

де k − коефіцієнт перетворення; T і τ − стала часу та час (транспортне) запізнення відповідно, с. Розрізняють термопари і термоперетворювачі опору малоінерційні ($T_{ТП}$ < 40 с для термопари і $T_{ТС}$ < 9 с для термоперетворювача опору), середній інерційності $T_{ТП}$ < 60 с, $T_{ТС}$ < 80 с), великій інерційності ($T_{ТП}$ < 3,5 хв, $T_{ТО}$ < 4 хв) і ненормованій інерційності. Транспортне запізнення τ = = 9...30с.

Типи термоелектричних перетворювачів. Типи ТП, літерні позначення номінальних статичних характеристик ТП, орієнтовний хімічний склад матеріалів термоелектродів і діапазони вимірюваних температур мають відповідати наведеним у табл. 12.6 (Відповідно до ДСТУ 2837−94. «Перетворювачі пермоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення». − Чинний від 01.01.1997.).

Таблиця 12.6.

Основні характеристики ТП

Типи ТП	Діапазон вимірюваних температур за довгочасного використання, °С	Гранична темпе ртура за короткочасного використання, °С	Граничнодопустимі відхилення НСХ, °С
ТПП 10 та ТПП 13 Клас 1	0...1300	1600	±1 від 0 до 1100 °С включно
			±[1+0,003(T°-1100)] понад 1100...1600 °С включно
ТПР Клас 2	600... 1600	1700	± 0,0025 $\lvert T^\circ \rvert$ 600... 1700 °С включно
ТХА Клас 1	Мінус 200... ...+1200	1300	±1,5 мінус 45.. .+375 °С включно
			± 0,004 $\lvert T^\circ \rvert$ понад 375... 1000 °С включно
ТХА Клас 2	Мінус 200... ...+120С	1300	+ 2,5 мінус 40... 333 °*С* включно
			+ 0,0075 $\lvert T^\circ \rvert$ понад 333... 1200 °С включно
ТХК Клас 2	Мінус 200... ...+600	800	+ 2,5 мінус 40.. .300 °С включно
			+ 0,0075 Ігі понад 300...800 °С включно

ТХК Клас 3	Мінус 200... ...+600	800	±0,015 $\lvert T^{\circ} \rvert$ мінус 200...мінус 100 °С включно
			±2,5 понад мінус 100...+100 °С включно
ТВР (*А*-1) Клас 2	0...2200	2500	± 0,005 $\lvert T^{\circ} \rvert$ понад 1000...2500 °С включно
ТВР (*А*-1) Клас 3	0...2200	2500	± 0,007 $\lvert T^{\circ} \rvert$ понад 1000...2500 °С включно

Таблиця 12.7

Типи термоелектричних перетворювачів, їх основні характеристики

Тип ТП	Літерне позначення НСХ		Матеріал термоелектродів		Діапазон вимірюваних температур за довгочасного використання, °С	Гранична температура за короткочасного використання, °С
	До 01.01. 1995 р.	З 01.01 1995 р.	позитивного	негативного		
1	2	3	4	5	6	7
ТПП 13 Платинородій-платинові (платина- 13 % родій/платина)	*ПП*(*R*)	*R*	Сплав платинородій ПР-13 (87 % Pt + + 13 % Rh)	Платина (Pi)	0...1300	+1600
ТПП 10 Платинородій-платинові (платина -10 % родій/платина)	*ПП*(*S*)	*S*	Сплав платинородій ПР-10 (90 % Pt + + 10 % Rh)		0...1300	+1600
ТПР Платинородій-шіатинородієві (платина - 30 % родій/платина – 6 % родій)	*ПР*(*B*)	*B*	Сплав платинородій ПР-30 (70%Pt + + 30 % Rh)	Сплав платинородій ІІР-6 (94% Pi + 6 % Rh)	+600...+1600	+ 1700
ТЗК Заілізо-константанові (залізо / мідь - нікель)	*ЗК*(*J*)	*J*	Залізо (Fe)	Сплав константан (55 % Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	-200...+750	+900
ТМКн Мідь-константанові (мідь/мідь - нікель)	*МК*(*T*)	*T*	Мідь М1(Cu)	Сплав константан (55%Си+45 %Ni,Mn,Fe)	-200...+350	+400

ТНН Ніхросил-нісилові (нікель - хром – кремній/нікель - кремній)	*НН*(*N*)	*N*	Сплав ніхросил [(83,49 - 84,89) % Ni + (13,7-14,7)% Cr + (1,2-1,6)% Si + 0,15% Fe + 0,05 % C + 0,01% Mg]	Сплав ніхросил [(94,98--95,53)%Ni + + 0,02 % Cr + + (4,2-4,6)% Si + + 0,15 % Fe+ + 0,05%C + + (0,05-0,2)%Mg]	-270...+1200	+ 1300
ТХА Хромель-алюмелеві (нікель - хром/нікель - алюміній)	*ХА*(*K*)	*K*	Сплав хромель Т НХ9,5 (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав алюмель НМцАК2-2-1 (94,5 % Ni + 5,5 % Al, Si, Mn, Co)	-200...+1200	+1300
ТМК Мідь-копелеві	*МК*(*M*)	*M*	Мідь М1(Cu)	Сплав копель МНМц 43-0,5 (56 % Cu + 44 % Ni)	-200...+100	+100
ТХКн Хромель-константанові (нікель — хром/мідь - нікель)	*ХК*(*E*)	*E*	Сплав хромель ТНХ9,5 (90,5 % Ni + 9,5 % Cr)	Сплав константан (55 % Cu + 45 % Ni, Mn, Fe)	-200...+700	+900
ТХК Хромель-копелеві	*ХК*(*L*)	*L*		Сплав копель МНМц 43 - 0,5 (56 % Cu + 44 % Ni)	-200...+600	+800
ТСС Сильх-силінові	*СС*(*I*)	*I*	Нікелевий сплав сильх НХК 9-0,9 [(87,6-89,2)% Ni + (8,8-9,8)% Cr + (0,6-1,2)% Si + 1 % Mn, Fe]	Нікелевий сплав сплін НК 2,4 [(91.8-92,6)% Ni + (2,0-2,8)% Si + 1 % Mn, Fe]	0...+800	+800
ТВР Вольфрамреній-вольфрамренієві	*ВР*(*А*) - 1 *ВР*(*А*) -2 *ВР*(*А*) - 3	*А* -1 *А* -2 *А* -3	Сплав вольфрамреній ВР-5 (95 % W + 5%Re)	Сплав вольфрамреній ВР-20 (80 % W+20%Re)	0...+2200 0...+1800 0...+1800	+2500

Примітки.

1. У дужках наведено найменування типів ТП, ухвалені Міжнародною електротехнічною комісією.

2. Хімічний склад матеріалів термоелектродів - орієнтовний.

Методичний приклад виконання завдання на практичне заняття
Звіт з практичного заняття №1
Вивчення статичних та динамічних характеристик первинних вимірювальних перетворювачів температури

Вихідні дані:

$T° = 9$ °С; $T = 80$ с; $\tau = 18$ с

Об’єкти вивчення

Об’єкти вивчення:

термоелектричні перетворювачі температури;

термоперетворювачі опору;

Мета заняття

закріплення, розширення й поглиблення теоретичних знань про перетворювачі температури;

вивчення характеристик приладів для вимірювання температури і первинних вимірювальних перетворювачів температури.

Завдання на практичне заняття

Щодо свого варіанту (табл. 12.1):

1. Вивчити теоретичні основи фізичної і конструктивної побудови перетворювачів температури;

2. Визначити для термоперетворювача опору мідного (ТОМ), що застосовується в діапазоні температур −10...+200 °C відношення опору для температури 100 °C до опору для 0°C − W_{100};

3. Побудувати графік номінальної статичної характеристики (НСХ) перетворення ТОМ і визначити його коефіцієнт передачі;

4. При заданій теплової інерційності ТОМ100М T і часу запізнювання τ отримати його передатну функцію;

5. Виконати завдання, оформити звіт про виконану роботу на папері у вигляді читацького тексту, подати його викладачу. Захистити роботу.

Звіт з практичного заняття виконується у вигляді зв'язного (читаного) тексту у файлі формату Microsoft Word (шрифт основного текста Times New Roman, 12 пунктів, через 1,5 інтервалу, вирівнювання по ширині).

Він повинен включати:

назву учбової дисципліни, номер і назву практичного заняття;

об’єкти вивчення і мету заняття;
прізвище і ініціали автора, номер групи;
прізвище і ініціали викладача;
номер варіанту;
результати обчислень, графіки, висновки, відповіді на питання.

1. Виконуємо перший пункт практичного заняття [28]**.** Тут послідовно привести якісний опис термоперетворювачів опору і термоелектричних перетворювачів. У цьому пункті необхідно відобразити принцип дії первинного вимірювального перетворювача, існуючі типи, умовне позначення номінальної статичної характеристики перетворення, діапазон вимірюваної температури, конструкцію.

2. Виконуємо другий пункт практичного заняття. Визначаємо для термоперетворювача опору мідного ТОМ100М (відповідно до заданого варіанту), що застосовується в діапазоні температур −10...+200 °*C* відношення опору для температури 109 °*C* до опору для 0°*C* − W_{109} і відношення опору для температури 9 °*C* до опору для 0°*C* − W_9 за виразом відповідно:

$$W_{109} = 1 + \alpha T° = 1 + 4{,}28\cdot10^{-3}\cdot(100 + 9) = 1{,}467;$$
$$W_9 = 1 + \alpha T° = 1 + 4{,}28\cdot10^{-3}\cdot9 = 1{,}0385.$$

Із співвідношення $R_{T°} = R_0 W_{100}$ визначаємо опір термоперетвотювача при $T°$ = 109 °С і опір термоперетвотювача при $T°$ = 9 °*C* відповідно:

$$R_{109} = R_0 W_{100} = 100\cdot1{,}467 = 146{,}7 \text{ Ом};$$
$$R_{0.9} = R_0 W_{100} = 100\cdot1{,}0385 = 103{,}85 \text{ Ом}.$$

де R_0 = 100 Ом −опір ТОМ100М при $T°$ = 0 °*C*.

3. Виконуємо третій пункт практичного заняття. Будуємо графік номінальної статичної характеристики (рис. 12.6) (НСХ) ТОМ100М і визначаємо коефіцієнт передачі *k*.

Номінальну статичну характеристику перетворення ТОМ100М визначаємо за рівнянням:

$$R_{T°} = R_{0.9} W_{109}.$$

За двох значень опорів $R_{0.9}$ = 103,85 Ом і R_{109} = 146,7 Ом, що відповідають температурі $T°$ = 9 °*C* та $T°$ = 109 °С відповідно, будуємо графік статичної характеристики перетворення ТОМ100М (рис. 12.6).

За статичною характеристикою та за співвідношенням $k = \alpha R_0 = \frac{dR_{T°}}{dT°}$ визначаємо коефіцієнт передачі ТОМ100М:

$$k = \alpha R_0 = \frac{dR_{T°}}{dT°} = 4{,}28\cdot10^{-3}\cdot100\cdot = \frac{146{,}7 - 103{,}85}{109 - 9} = 0{,}429 \text{ с}^{-1}.$$

4. Виконуємо четвертий пункт завдання. При заданій теплової інерційності ТОМ100М T = 80 с і часу запізнювання τ = 18 с, отримаємо його передатну функцію.

За динамічними властивостями термоперетворювач опору ТОМ100М є інерційною ланкою першого порядку. Тому його передатна функція має бути записана у вигляді:

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-\tau \cdot s} = \frac{0{,}429}{80s+1} e^{-18 \cdot s}.$$

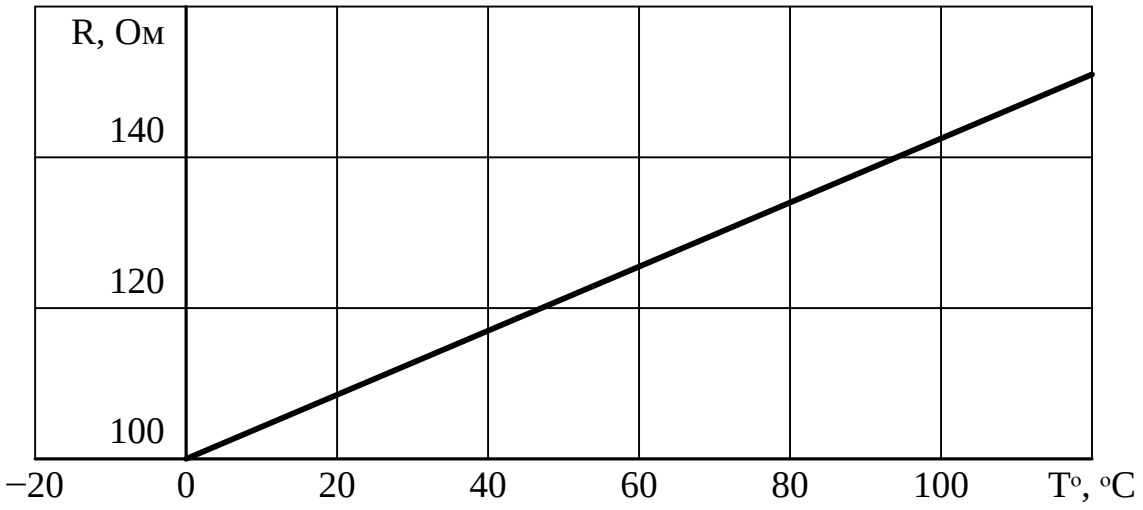


Рис. 12.6. Статична характеристика перетворення ТОМ100М

Висновки

У висновках треба відбити результати виконаненої роботи, тобто привести звіт за кожний пункт завдання на практичне заняття.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні групи термочутливих елементів.
2. Назвіть первинні вимірювальні перетворювачі температури з термоелементами розширення.
3. Назвіть методи вимірювання температури.
4. Чим відрізняється принцип дії біметалічних термоелементів від ділатометричних?
5. Які основні елементи манометричних термосистем?
6. Назвіть види манометричних термосистем.
7. Які фізичні закономірності використовують при побудові електричних термочувствітельних елементів?
8. Які недоліки напівпровідникових терморезисторів?
9. Як розшифрувати позначення термопар ТХК, ТПП, ТХА?

Практичне заняття №2

Логічні елементи

Основні закони алгебри логіки

При перетворенні ЛФ використовують основні закони алгебри логіки (були закладені більше 100 років тому англійським математиком Дж. Булем у 1854 р.:

сполучний

$$(a \vee b) \vee c = a \vee (b \vee c) = a \vee b \vee c; \qquad (12.6)$$

$$(a \wedge b) \wedge c = a \wedge (b \wedge c);$$

переміщення:

$$a \vee b \vee c = b \vee a \vee c = c \vee b \vee a; \qquad (12.7)$$

$$a \wedge b \wedge c = b \wedge c \wedge a;$$

розподільний:

$$(a \vee b) \wedge c = a \wedge c \vee b \wedge c;$$

$$a \wedge b \vee c = (a \vee c) \wedge (b \vee c); \qquad (12.8)$$

закони інверсії:

інверсія логічної суми двох й більше величин дорівнює добутку інверсій

цих величин:

$$\overline{a \vee b \vee c} = \bar{a} \wedge \bar{b} \wedge \bar{c}; \qquad (12.9)$$

інверсія логічного добутку двох й більше величин дорівнює сумі інверсій

цих величин:

$$\overline{a \wedge b \wedge c} = \bar{a} \vee \bar{b} \vee \bar{c}; \qquad (12.10)$$

закони поглинання:

$$a \wedge (a \vee b) = a; \quad a \vee a \wedge b = a;$$

$$a \wedge (a \vee b) \wedge (a \vee c) = a;$$

$$a \vee a \wedge b \vee a \wedge c = a; \qquad (12.11)$$

закони склеювання:

$$a \wedge b \vee a \wedge \bar{b} = a; \quad (a \vee b) \wedge (a \vee \bar{b}) = a. \qquad (12.12)$$

Наслідки законів алгебри логіки:

$$a \vee 0 = a; \; a \vee 1 = 1; \; a \vee a = a; \; a \vee \bar{a} = 1; \; a \wedge b \vee a \wedge \bar{b} = a; \; \bar{\bar{a}} = a;$$

$$a \wedge 0 = 0; \; a \wedge 1 = a; \; a \wedge a = a \; a \wedge \bar{a} = 0; \; (a \vee b) \wedge (a \vee \bar{b}) = a. \qquad (12.13)$$

Ці закони використовують при мінімізації алгебраїчних виражень логічних функцій з метою одержання структур, що містять найменше число логіч-них елементів, а також рівносильних виражень при синтезі логічних пристроїв.

Задана ЛФ може бути представлена в кон'юнктивній або диз'юнктивній формах. Логічна функція кон'юнктивної форми - це кон'юнкція окремих членів, що містять тільки диз'юнкції й інверсії.

Функція, у якій інверсія застосовується безпосередньо до аргументів (*а*, *в*, *с*...), але не до більш складних функцій, називається *кон'юнктивною нормальною формою* (КНФ.) даної ЛФ:

$$f(a,b,c) = a \wedge (a \vee b) \wedge (a \vee b \vee c).$$

Якщо функція від n аргументів містить усі набори змінних у КНФ, при яких $f = 0$, а кожний член КНФ містить усі аргументи (з інверсією або без неї), то така форма ЛФ називається *довершеною кон'юнктивною нормальною формою* (ДКНФ) даної функції.

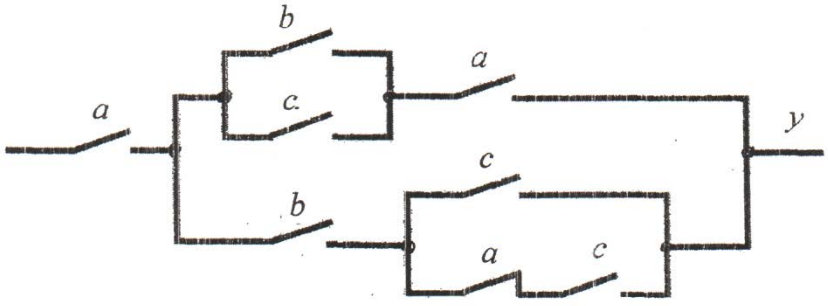
Мінімізація логічних функцій

Спрощення логічної функції

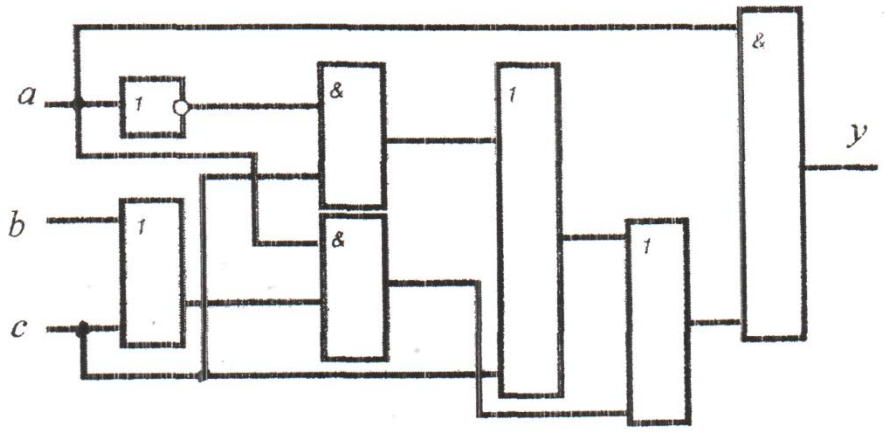
Наслідки законів алгебри логіки використовуються для мінімізації логічних функцій складної системи з метою її спрощення. Припустимо, є логічна функція такого вигляду [28]:

$$y = a \wedge [(b \vee c) \wedge a \vee b \wedge (c \vee \bar{a} \wedge c)]. \qquad (12.14)$$

Релейно-контактна схема і схема на логічних елементах, що реалізують наведену логічну функцію, зображені на рис. 12.7, *а* і *б*.



а



б

Рис.12.7 Схеми реалізації логічної функції (9).

Запишемо функцію (12.14) в звичайних, більш звичних позначеннях операцій додавання і множення:

$$y = a \cdot [(b + c) \cdot a + b \cdot (c + \bar{a} \cdot c)]. \qquad (12.15)$$

На підставі законів алгебри логіки і їхніх наслідків виконаємо перетворення, розкривши дужки:

$$y = a \cdot b \cdot a + a \cdot c \cdot a + a \cdot b \cdot c + a \cdot b \cdot \bar{a} \cdot c. \qquad (12.16)$$

На підставі наслідків $a \wedge a = a$ і $a \wedge \bar{a} = 0$ отримаємо:

$$y = a \cdot b + a \cdot c + a \cdot b \cdot c + 0 \cdot b \cdot c,$$

або, згрупувавши перший і третій доданки, отримаємо:

$$y = a \cdot (b + c).. \qquad (12.17)$$

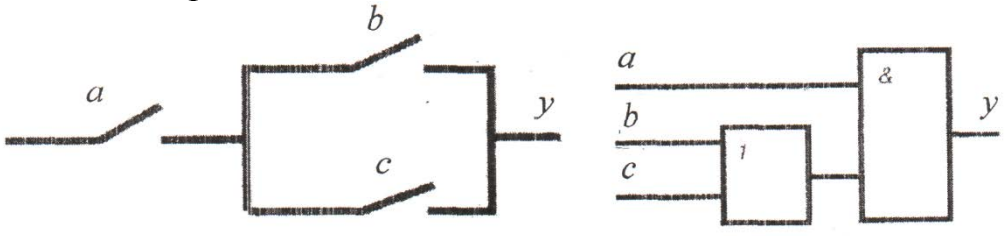
Застосовуючи закон $(a \vee b) \wedge c = a \wedge c \vee b \wedge c$, запишемо:

$$y = a \cdot b + a \cdot c. \qquad (12.18)$$

Винісши за дужки a, отримаємо:

$$y = a \cdot (b + c). \qquad (12.19)$$

Більш прості схеми, що реалізують отриману спрощену логічну функцію, наведені на рис. 12.8, *а* і *б*.



а *б*

Рис. 12.8. Схеми реалізації логічної функції (6)

Аналогічним чином можна розв'язати обернену задачу.

Припустимо, що є релейно-контактна схема або схема на логічних елементах, зображені на рис. 12.7, *а* або *б.*

Запишемо логічну функцію, реалізовану за допомогою цієї схеми. Очевидно, вона буде мати вигляд (12.14). Далі, використовуючи наслідки законів алгебри логіки, як було показано вище, спрощуємо цю функцію і приводимо її до вигляду (12.19). Схеми, наведені на рис. 12.8, *а* і *б,* є результатом спрощення схем, показаних на рис. 12.7, *а* і *б.*

Розглянемо спрощення логічних виразів, у яких операція заперечення відноситься не до окремої змінної, а до складних виразів.

Тотожні перетворення таких виразів приводять до використання законів інверсії. Розглянемо логічну функцію:

$$y = \overline{\left(a \vee b \vee \overline{c}\right) \wedge \overline{a \wedge \overline{b}}} \vee \overline{a} \wedge \overline{c}. \qquad (12.20)$$

Послідовність застосування правил інвертування виразів така: відповідно до закону інверсії $\overline{a \vee b \vee c} = \overline{a} \wedge \overline{b} \wedge \overline{c}$:

$$y = \overline{[(a \vee b \vee \overline{c}) \wedge \overline{a \wedge \overline{b}}]} \wedge \overline{\overline{a}} \wedge \overline{\overline{c}}$$

і наслідку $\overline{\overline{a}} = a$:

$$y = [\overline{(a \vee b \vee \overline{c})} \vee \overline{a \wedge \overline{b}}] \wedge (a \vee c);$$

$$y = (\overline{a} \wedge \overline{b} \wedge c \vee a \wedge \overline{c}) \wedge (a \vee c). \qquad (12.21)$$

Перемноживши почленно вирази в дужках, у відповідності з наслідками законів логіки одержимо:

$$\begin{aligned} y &= a \wedge a \wedge \overline{b} \wedge c \vee a \wedge a \wedge \overline{b} \vee c \wedge \overline{a} \wedge \overline{b} \wedge c \vee a \wedge \overline{b} \wedge c = \\ &= a \wedge \overline{b} \vee \overline{a} \wedge \overline{b} \wedge c \vee a \wedge \overline{b} \wedge c = a \wedge \overline{b} \wedge (1 \vee c) \vee \overline{a} \wedge \overline{b} \wedge c = a \wedge \overline{b} \vee \overline{a} \wedge \overline{b} \wedge c = \\ &= \overline{b} \wedge (a \vee c). \end{aligned} \qquad (12.22)$$

Таким чином, під мінімізацією логічних функцій розуміють таку форму запису цих функцій, у якій число логічних елементів, що здійснюють найпростіші логічні операції, є мінімальним.

Будь-яка логічна функція може бути задана таблицею її значень при різних наборах аргументів (таблицею істинності). Для функції *n* аргументів число всіх наборів дорівнює 2" (число рядків у таблиці істинності). При складанні таблиці істинності доцільно кожний набір аргументів подати у вигляді номера, рівного двійковому числу натурального ряду цифр від 0 до *n.* При такому складанні таблиці жодного набору аргументів не буде пропущено.

Синтез систем дискретної автоматики

Системи електроавтоматики з релейними елементами широко використовуються для автоматизації різних періодичних технологічних процесів, а також для автоматичного керування різними робочими машинами й механізмами.

Для керування періодичними процесами й машинами, що працюють за графіком, застосовуються *однотактні* і *багатотактні* системи автоматичного керування.

В однотактних системах, що реалізують комбінаційні ЛФ, наявність сигналу на виході системи визначається тільки комбінацією значень сигналів на вході, що надходять від датчиків, що задають і командних обладнань, тобто сигнали на виході системи однозначно визначаються сигналами на вході. У багатотактних системах, що реалізують послідовні ЛФ, сигнали на виході автоматичного обладнання визначаються не тільки вхідними сигналами, що зробили в даний момент, але й послідовностями появи вхідних сигналів, тобто при одній і тій же комбінації вхідних сигналів на виході багатотактного автоматичного пристрою можуть бути різні вихідні сигнали. Тому багатотактні пристрої й системи повинні "запам'ятовувати" послідовність появи вхідних сигналів. Багатотактні системи, що містять елементи "пам'яті", зворотні зв'язки, різні додаткові елементи, є основними системами дискретної автоматики. Основним завданням синтезу автоматичних систем керування є розробка структури автоматичного пристрою й складання схем, що реалізують отриману структуру. При цьому на підставі заданих умов роботи автоматичного пристрою складаються структурні формули (алгебраїчні вираження), що описують роботу розроблювальної автоматичної системи або пристрою. Потім у результаті мінімізації одержують найбільш прості алгебраїчні вираження, на підставі яких виконують структурні й електричні схеми. На практиці застосовують спеціальні методи логічного синтезу структур автоматичних систем керування. Досить добре розроблені методи синтезу, засновані на використанні таблиць станів і включень, циклограм, таблиць переходів і карт Карно, з використанням графів і т.д. У цьому параграфі розглянемо на прикладі найпростіших систем деякі питання логічного синтезу структур дискретних систем електроавтоматики. Більш докладно питання логічного синтезу описані в [4].

Синтез дискретних систем електроавтоматики за таблицми станів

За такими таблицями досить просто може бути виконаний синтез однотактних систем керування. Таблиці станів становлять на основі вивчення

умов роботи технологічних апаратів або робітників машин і визначення, при яких співвідношеннях вхідних сигналів повинні бути сигнали на виході, а при яких немає. На підставі таблиць становлять структурну формулу, що описує логічні зв'язки даної системи й, отже. ее структуру, що визначає. При складанні структурних формул застосовують п р а в и л о про істиності (правило одиниць) або ж правило хибності (правило нулів).

Згідно із правилом одиниць для рядків таблиць станів, де вихідна величина 1, визначають добутки вхідних величин і складають їх, тобто визначають диз'юнкції кон'юнкцій вхідних змінних для рядків, де вихідна величина рівна 1. Якщо значення вхідної величини 0, то беруть її інверсію.

Згідно із правилом хибності, структурну формулу становлять шляхом визначення кон'юнкції диз'юнкцій вхідних сигналів рядків таблиць станів, у яких вихідна величина рівна 0. Якщо величина рівна 1, беруть її інверсію. Складання структурних формул на підставі таблиць станів розглянемо на прикладі.

Приклад. Нехай робота об'єкта контролюється трьома датчиками. Умови роботи системи: на виході логічного пристрою повинен з'явитися сигнал ***y*** , що приводить у дію виконавчий елемент, якщо на вхід надходять два із трьох будь-яких сигналів або всі три сигнали (мажоритарна функція, схема голосування два із трьох).

Таблиця станів (табл. 12.8) для даного прикладу має наступний вид:

Таблиця 12.8

Таблиця станів

№п.п	Входи			Вихід
	a	*b*	*c*	*y*
1	0	0	0	0
2	1	0	0	0
3	0	1	0	0
4	0	0	1	0
5	1	1	0	1
6	1	0	1	1
7	0	1	1	1
8	1	1	1	1

Структурна формула, що визначає умови роботи схеми і складена згідно із правилом одиниць, має вид:

$$y = a \cdot b \cdot \bar{c} \vee a \cdot \bar{b} \cdot c \vee \bar{a} \cdot b \cdot c \vee a \cdot b \cdot c. \qquad (12.23)$$

Отримане вираження мінімізується з метою одержання структури, що вимагає мінімального числа елементів, необхідних для реалізації даного логічного пристрою. Для цього використовуються основні закони алгебри

логіки або спеціальні методи. Попередньо для спрощення двічі повторимо останній член вираження (12.23), а потім згрупуємо й винесемо загальні множники, одержимо:

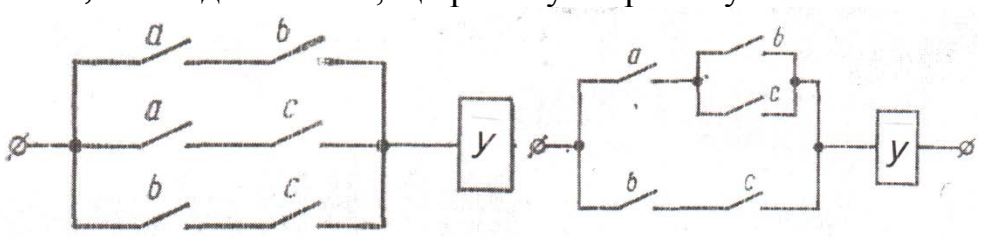
$$y = a \cdot b \cdot \bar{c} \vee a \cdot \bar{b} \cdot c \vee \bar{a} \cdot b \cdot c \vee a \cdot b \cdot c \vee a \cdot b \cdot c \vee a \cdot b \cdot c;$$

$$y = a \cdot b \cdot (\bar{c} \vee c) \vee a \cdot c \cdot (\bar{b} \vee b) \vee b \cdot c \cdot (\bar{a} \vee a).$$

Тому що вираження в дужках дають 1, то структурна формула має вид:

$$y = a \cdot b \vee a \cdot c \vee b \cdot c. \qquad (12.24)$$

На рис. 12.9, *а* наведена схема, що реалізує отриману ЛФ.



а *б*

Рис. 12.9. Релейно – контактні схеми, що реалізують мажоритарну ЛФ

Подальше спрощення (12.24) приводить до виду

$$y = a \cdot (b \vee c) \vee b \cdot c. \qquad (12.25)$$

На рис. 12.9, б наведена схема, що реалізує ЛФ (12.25).

КАРТИ КАРНО

Основні теоретичні положення

Карта Карно − один з графічних способів подання логічних функцій. Для функцій n змінних вона складається з 2^n клітинок, причому кожна клітинка відповідає певному набору змінних. Вигляд карт Карно для функцій 2,3,4,5 і 6-ти змінних зображений на рис. 12.10 Вхідні змінні розміщуються з зовнішніх сторін карти проти її рядків або стовпців. Значення вхідної змінної стосується усіх клітинок у рядку або стовпці і дорівнює 1, якщо проти рядка або стовпця є дужка з позначенням цієї змінної. Для решти рядків і стовпців значення змінної дорівнює 0. У клітинках карти записується те значення функції, яке вона має при наборах вхідних змінних, що відповідають цим клітинкам.

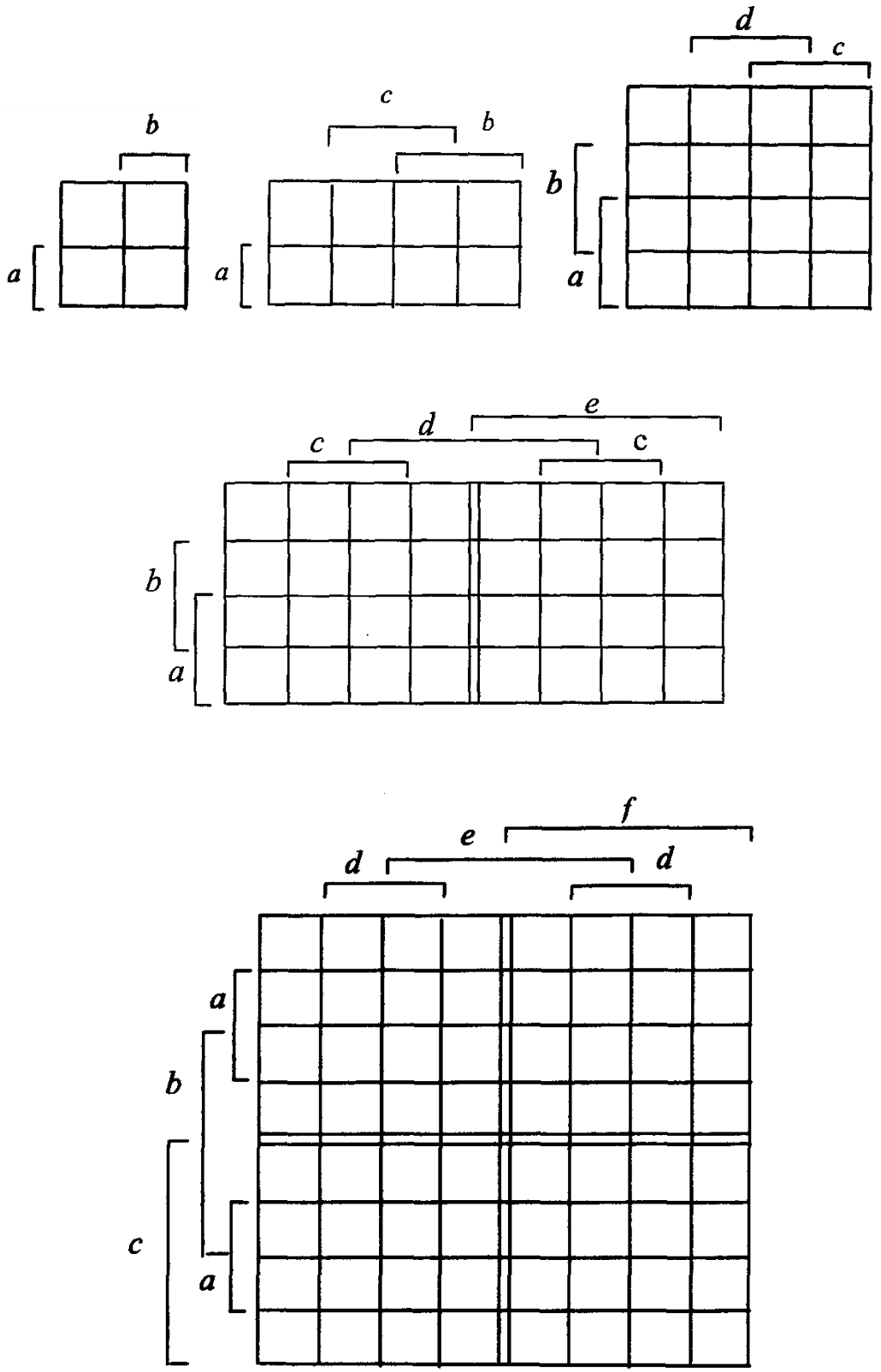


Рис. 12.10. Вигляд карт Карно для функцій 2,3,4,5 і 6-ти змінних

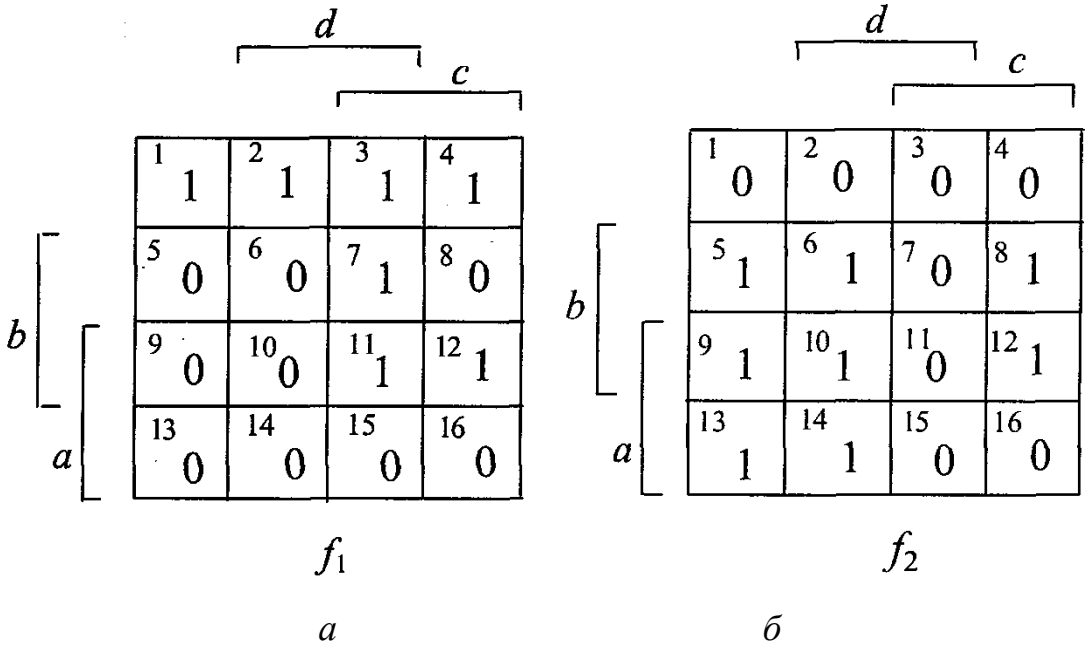
Функцію, задану алгебраїчним виразом, можна подати у вигляді карти Карно. Для цього перед усім задану функцію треба подати в диз'юнктивній (ДНФ) або кон'юнктивній (КНФ) нормальній формі. Розглянемо, як складається карта Карно для функції

$$f_1 = abc + \overline{a}\,\overline{b} + bcd\,,$$

поданої в ДНФ. Задана функція є функцією чотирьох змінних. Карту Карно для неї зображено на рис.12.11, *а*. Кон'юнкції *abc* відповідають дві клітинки, для яких $a = 1$, $b = 1$, $c = 1$ (це 11-та і 12-та клітинки), кон'юнкції $\bar{a}\,\bar{b}$ − чотири клітинки, для яких $a = 0$, $b = 0$ (1,2,3 і 4-та), кон"юнкції *bcd* − клітинки, для яких $b = 1$, $c = 1$, $d = 1$ (7-ма і 11-та). Заповнивши ці клітинки одиницями, а решту нулями, отримаємо карту Карно, що зображує функцію f_1 (клітинки пронумеровано тільки для зручності пояснення процесу заповнення карти Карно).

Розглянемо тепер, як заповнюється карта Карно для функції, поданої у КНФ,

$$f_2 = (a + b)(b + \bar{c} + d)(\bar{c} + d).$$



а *б*

Рис. 12.11 Карта Карно для функції чотирьох змінних

Диз'юнкції $a + b$ відповідає група клітинок, для яких $a + b = 0$, тобто $a = 0$, $b = 0$ (1, 2, 3 і 4-та клітинки карти Карно на рис.12.11,б). Диз'юнкції $b + \bar{c} + d$ відповідають клітинки, для яких $b = 0$, $c = 0$ $d = 0$, тобто 4 та 16-та. Диз'юнкції $\bar{c} + \bar{d} = 0$ відповідає група клітинок, для яких $c = 1$, $d = 1$. Це 3,7,11 і 15-та клітинка. Заповнивши ці клітинки нулями, а решту − одиницями, отримаємо карту Карно, що зображує функцію f_2.

За допомогою карт Карно досить просто відшуковувати кон'юнкції або диз'юнкції, до яких можна застосувати закон склеювання (12.12) або (12.11) і таким чином мінімізувати логічну функцію. Вираз для клітинки з одиницею складається у вигляді кон'юнкції усіх змінних, причому, якщо змінна для цієї клітинки дорівнює одиниці, то вона записується без знака інверсії, а якщо дорівнює нулеві − із знаком інверсії. Наприклад, для клітинок 1 і 2 з одиницями (рис.12.11, *а*) ці вирази мають вигляд $\bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d}$ і $\bar{a}\bar{b}\bar{c}d$. Вираз для клітинки з нулем записується у вигляді суми усіх змінних, причому, якщо змінна для цієї клітинки дорівнює нулеві, то вона записується без знака

інверсії, а якщо дорівнює одиниці − із знаком інверсії. Наприклад, для клітинок 5 і 6 з нулями (рис. 12.11, *а)* ці вирази мають вигляд:

$$a+\bar{b}+c+d\ ,\ a+\bar{b}+c+\bar{d}\ .$$

Вирази для клітинок, що розміщуються поряд, відрізняються значенням тільки однієї змінної, тобто до них можна застосувати операцію склеювання, отже, для клітинок 1 і 2:

$$\bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d}\ +\ \bar{a}\bar{b}\bar{c}d\ =\ \bar{a}\bar{b}\bar{c}\ ,$$

а для клітинок 5 і 6

$$(a+\bar{b}+c+d)\ (a+\bar{b}+c+\bar{d})\ =\ (a+\bar{b}+c).$$

Будь-які клітинки, яким відповідають склеювані комбінації вхідних змінних, називаються сусідніми. Сусідніми є не тільки клітинки, що розміщені поряд одна одної у одному рядку або стовпці, але й клітинки у протилежних кінцях одного рядка або стовпця карти чотирьох змінних.

Для карти чотирьох змінних знаходити сусідні клітинки досить просто. Задача деякою мірою ускладнюється для карт п'ятьох, шістьох і більшої кількості змінних. Карту п'ятьох змінних можна подати у вигляді двох карт чотирьох змінних, карту шістьох змінних - у вигляді чотирьох карт чотирьох змінних тощо. Карти чотирьох змінних, що відрізняються значенням тільки однієї змінної, можна назвати сусідніми. Тоді сусідні карти будуть розміщуватися поряд одна одної або у протилежних кінцях одного рядка або стовпця з карт чотирьох змінних і, отже, сусідніми будуть клітинки, що є сусідніми у тієї ж самої карти чотирьох змінних, або клітинки у сусідніх картах, які розміщуються симетрично відносно ліній, що ділять карту великої кількості змінних на карти чотирьох змінних.

При використанні карт Карно для мінімізації логічних функцій необхідно побудувати карту для відповідної кількості змінних і нанести на неї задану функцію. Потім слід об'єднати сусідні клітинки з одиницями в контури, записати вирази для контурів і скласти їх диз'юнкцію.

Сусідні клітинки спочатку об'єднують в пари, потім четвірки з сусідніх пар, тобто пар, що відрізняються тільки однією змінною, після цього сусідні четвірки об'єднують у вісімки тощо. Чим більше клітинок об'єднано в контур, тим простіший вираз, що відповідає контуру. Тому слід прагнути того, щоб кожний контур мав якомога більше клітинок. При цьому деякі контури можуть частково перекриватися, тобто ті ж самі клітинки можуть одночасно входити у кілька контурів. У контур можна об'єднувати не будь-яку парну кількість клітинок, а тільки 2^n клітинок, тобто 2,4,8,16 тощо. Крім того, необхідно уникати створення зайвих контурів, тобто контурів, усі клітинки яких вже належать до інших контурів. Для цього об'єднування слід починати з тих клітинок з одиницями, які можуть увійти тільки у один контур. Це положення ілюструється картою Карно на рис.12.2, *а*. Контур з чотирьох

одиниць тут зайвий через те, що усі клітинки цього контуру вже увійшли до інших контурів.

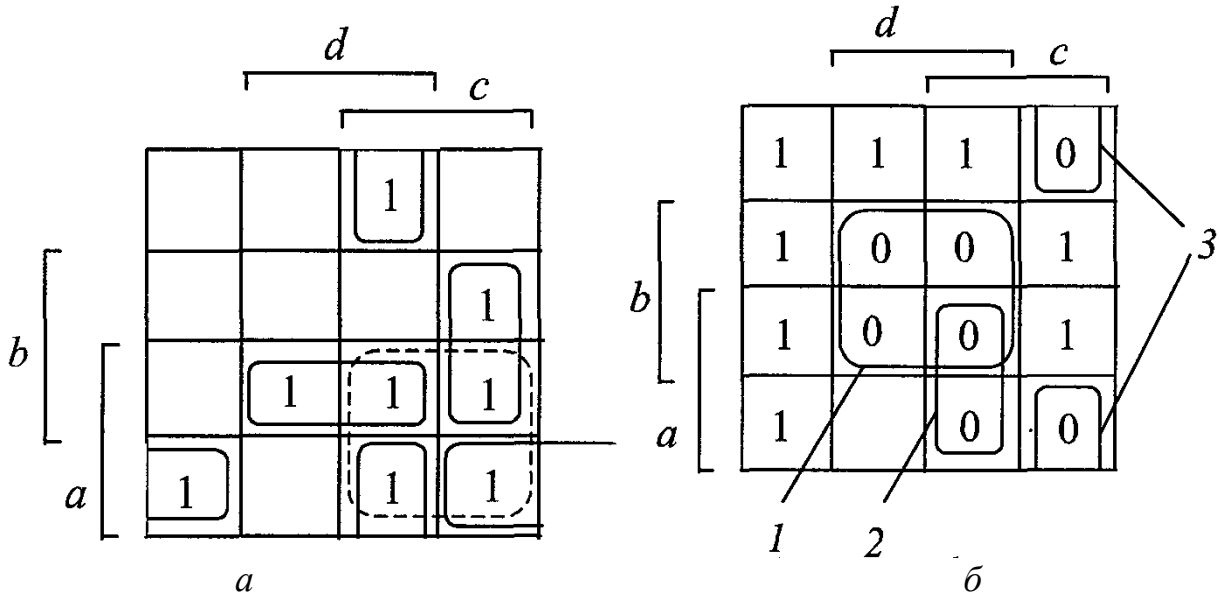


Рис. 12.12. Положення (ілюструється картою Карно) клітинок з одиницями, які можуть увійти тільки у один контур

Вираз для функції, яку задано картою Карно на рис.12.12,а, має вигляд:

$$a\bar{b}\bar{d} + \bar{b}cd + abd \quad bc\bar{d} .$$

У контури можна об'єднувати клітинки не тільки з одиницями, а й з нулями. При цьому усі правила об'єднування залишаються попередніми, але функція записується у вигляді кон'юнкції диз'юнкцій, яким відповідають контури з нулями.

Вираз для контуру з нулями записується у вигляді диз'юнкції інверсій координат контуру. Наприклад, об'єднавши клітинки з нулями в карті Карно на рис.12.12, *б*, отримаємо для першого контуру вираз $\bar{b} + d$, для другого $\bar{a} + \bar{c} + \bar{d}$, для третього $b + \bar{c} + d$. Функція у КНФ матиме вигляд:

$$(\bar{b} + \bar{d})(a + \bar{c} + \bar{d})(b + \bar{c} + d) .$$

Приклади мінімізації логічних функцій за допомогою карт Карно ілюструються рис.12.13, де показано способи об'єднання клітинок з одиницями в контури. У результаті виконаних об'єднань отримано такі мінімізовані вирази функцій:

$f_1 = abc + ad + bc + ca^1;$

$f_2 = cde + bcd + ab\,e + aca^1.$

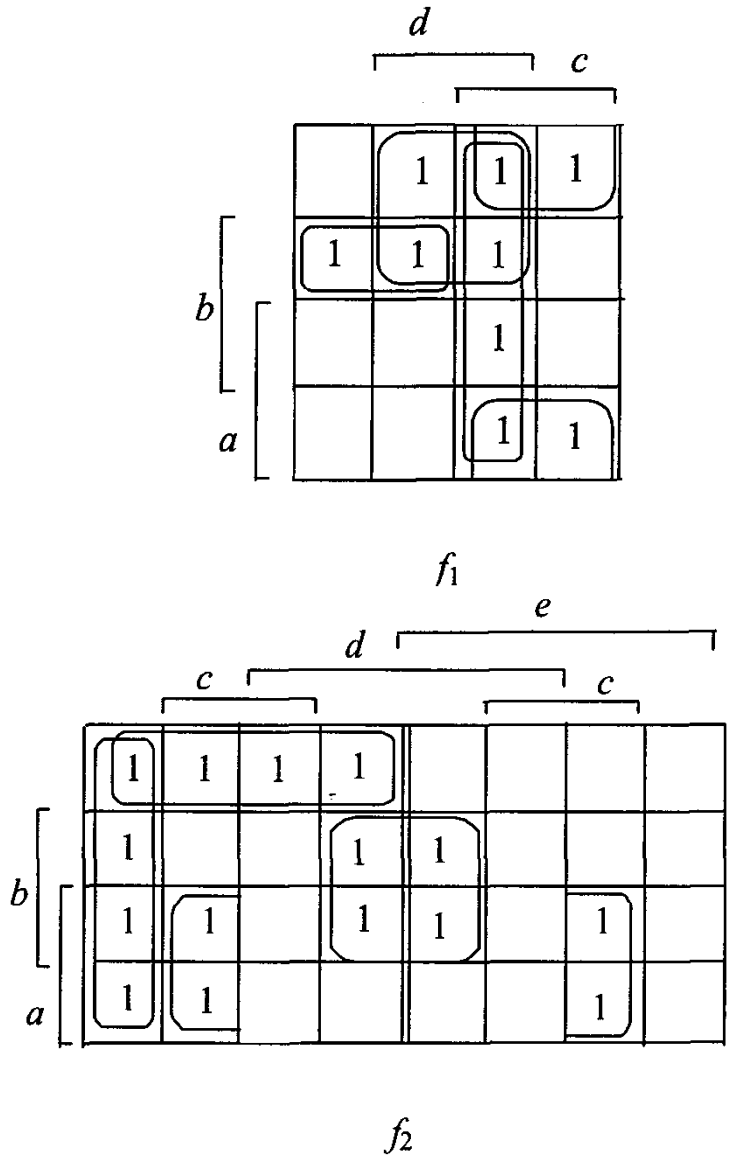


Рис.12.13. Приклади мінімізації логічних функцій за допомогою карт Карно

Завдання для аудиторних занять

1. Мінімізувати такі логічні функції за допомогою карти Карно:

abc d + abcd + a bcd + abd + bcd + acd + abd;

(ab + c)(a + b)c + a b c;

a + ab + abc + abcd + abcde;

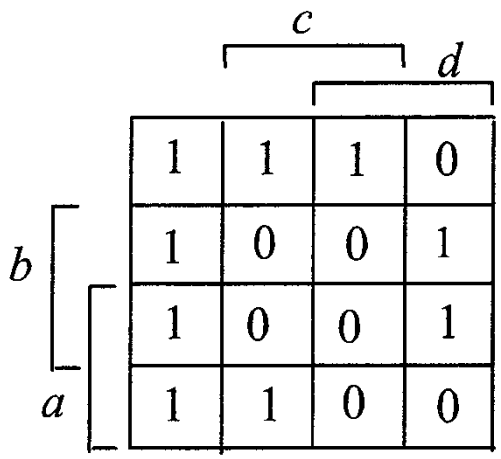
ad(b + c) + ad(b + c) + (b + c)(b + c) + abcd.

2. Перевірити справедливість таких рівностей:

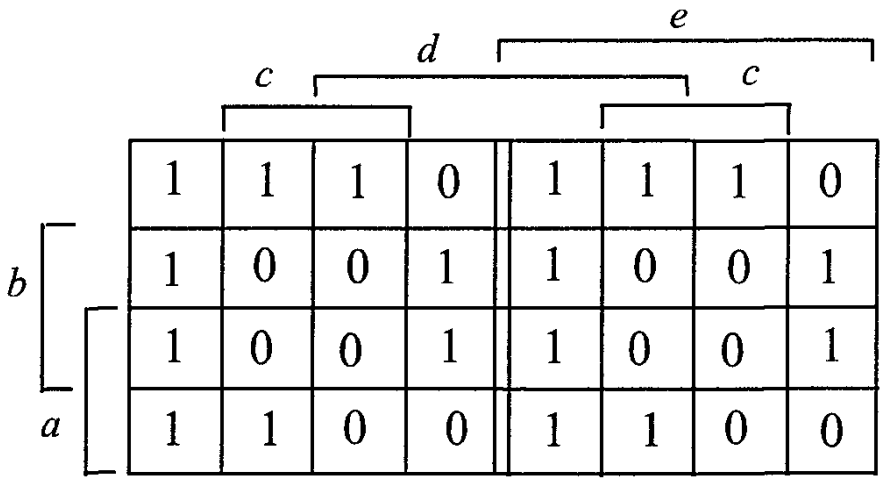
ab + a b + bcd = ab + a b + acd;

ab + c d + abcd + abcd – (a + d)(b + c)

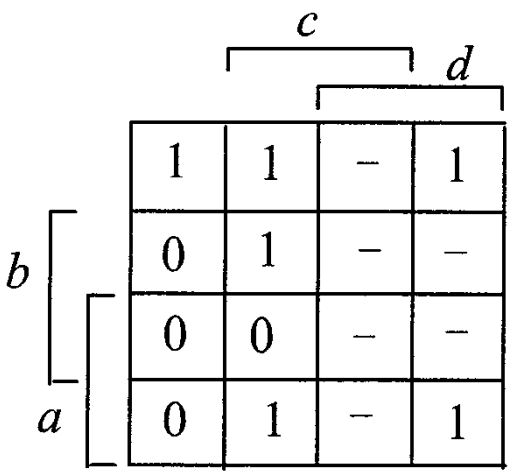
3. Записати мінімізовані ДНФ та КНФ функцій, поданих картами Карно на рис.12.14.


c
d
b
a
1 1 1 0
1 0 0 1
1 0 0 1
1 1 0 0

f_1


e
d
c
c
b
a
1 1 1 0 1 1 1 0
1 0 0 1 1 0 0 1
1 0 0 1 1 0 0 1
1 1 0 0 1 1 0 0

f_2


c
d
b
a
1 1 – 1
0 1 – –
0 0 – –
0 1 – 1

f_3

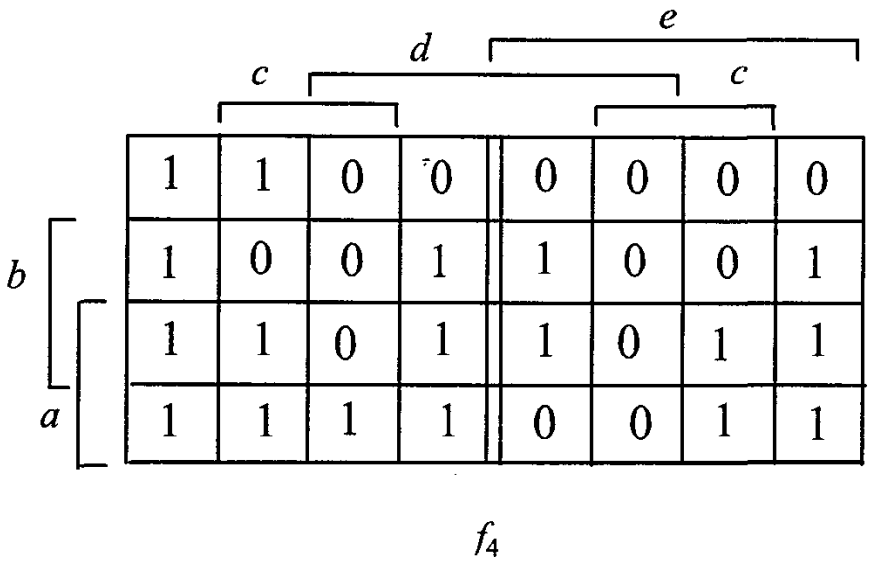


Рис. 12.14. Мінімізовані ДНФ та КНФ функцій, поданих картами Карно

Завдання для самостійної роботи

1. Мінімізувати такі логічні функції за допомогою карти Карно [28]:

acd + bcd + acd + acd + abc + acd + abc;

ad + abc- ac + bcd + abd

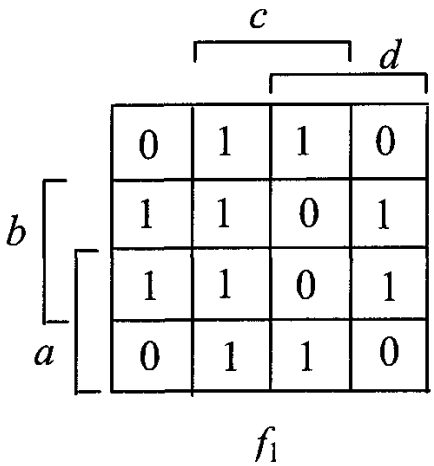
(a + b + c + a)(a + b + c + d)(a + b + c + d)(a + *b + c + d)*

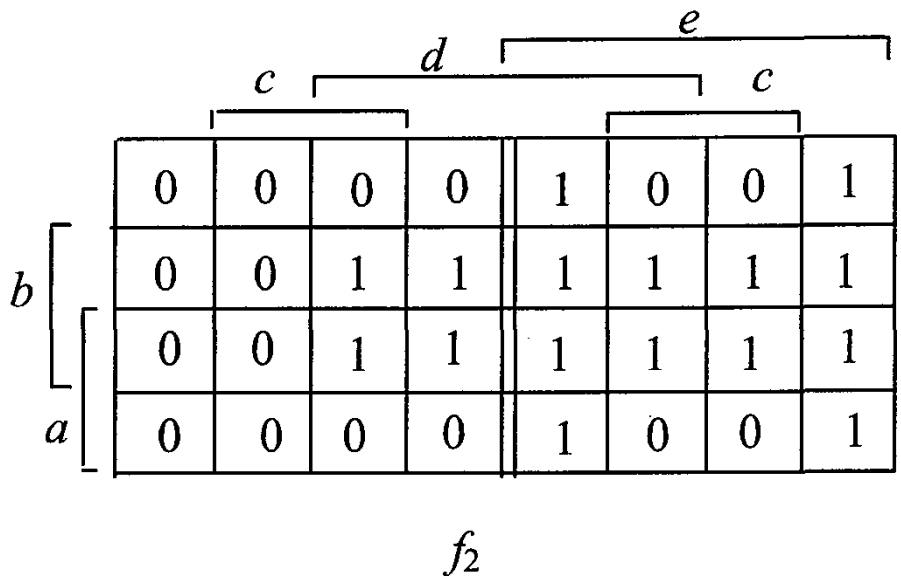
(a + b)(b + c)(c + a) + abc + a c.

2. Перевірити справедливість таких рівностей:

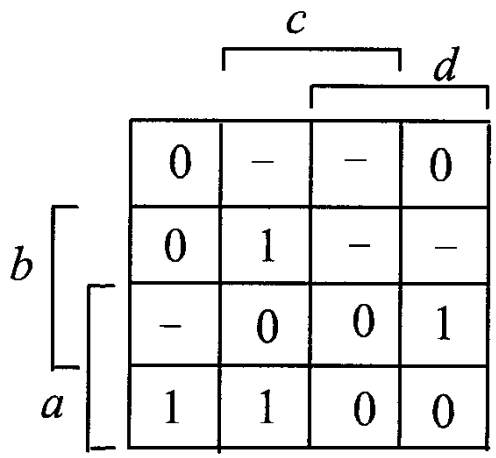
(ab + c)(a + b)a + abd = abd + acd + bcd + c + ad + bd + (c + a)(b + a)(b + a).

3. Записати мінімізовані ДНФ та КНФ функцій, поданих картами Карно на рис.12.15.

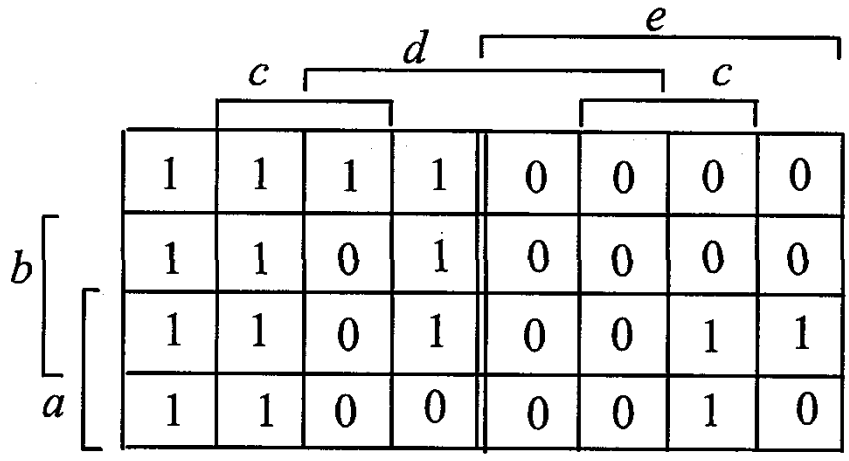




f_2



f_3



f_4

Рис. 12.15. Мінімізовані ДНФ та КНФ функцій, поданих картами Карно

Контрольні запитання та завдання

1. Найпростіші логічні елементи. Позначення на схемах, таблиці істинності і часові діаграми.

2. Логічний елемент І-НІ. Позначення на схемах, таблиця істинності і часова діаграма.

3. Логічний елемент АБО-НІ. Позначення на схемах, таблиця істинності і часова діаграма.

4. Релейно - контактні схеми найпростіших логічних операцій.

5. Довести тотожність логічних виразів:

$$a \vee a \cdot b = a;$$

$$a \vee \overline{a} \cdot b = a \cdot b;$$ -завдання на сам. роботу

$$\overline{a} \vee a \cdot b = \overline{a} \vee b.$$

Практичне заняття №3

Структурні функціональні схеми та загальні функціональні елементи вимірювальних перетворювачів

Мета заняття:

поширити та поглибити теоретичні знання про функціональні схеми та загальні структурні елементи вимірювальних перетворювачів (ВП);

набути навички структурного функціонального аналізу ВП;

виконати завдання на практичне заняття та на самостійну роботу;

за результатами їх виконання оформити звіт на папері та подати його викладачеві.

Завдання на практичне заняття

Завдання на практичне заняття складається із трьох варіантів:

Завдання 1 та **Завдання 4** є першим варіантом. Його виконують студенти з номером від 1 до 10 за списком групи;

Завдання 2 та **Завдання 5** є другим варіантом. Його виконують студенти з номером від 11 до 20 за списком групи;

Завдання 3 та **Завдання 6** є третім варіантом. Його виконують студенти з номером від 21 до 30 за списком групи.

Відповідно до свого варіанта:

1. Вивчити теоретичні положення, які стосуються теми практичного заняття.

2. Вивчити принцип дії та скласти функціональну схему вимірювального перетворювача.

виконати завдання на практичне заняття;

за результатами його виконання оформити звіт на папері та подати його викладачеві.

Звіт з практичного заняття виконується у вигляді зв'язного (читаного) тексту у файлі формату Microsoft Word (шрифт основного текста Times New Roman, 14 пунктів, через 1,5 інтервалу, вирівнювання по ширині).

Він повинен включати:

назву учбової дисципліни, номер і назву практичного заняття;
мету і завдання на практичне заняття;
прізвище і ініціали авторів, номер групи;
прізвище і ініціали викладачів;
номер варіанту;
результати виконання всіх пунктів завдання;
результати обчислень, графіки, висновки, відповіді на питання.

Під виконаною роботою ставиться підпис її автора.

Варіанти завдань на практичне заняття

Завдання 1. Вивчити принцип дії та скласти функціональну схему ВП зрівноважувального перетворення [28]**.**

Принципову схему буйкового рівноміра зрівноважувального перетворювача із пневматичним вихідним сигналом показано на рис.12.16.

Без контрольованої рідини вага буйка компенсується зусиллям пружини коректора нуля (0,02 МПа) 5. У разі занурення частини буйка 1 у контрольовану рідину вихідний сигнал формуватиметься виштовхувальною силою N_A, пропорційно вимірювальному рівневі h:

$$N_A = \rho_P S_б h g . \qquad (12.26)$$

Дія виштовхувальної сили N_A призводить до виникнення на важелі 2 моменту $M_{ВХ} = aN_A = \rho_P S_б h g$, пропорційного висоті рівня h. Це зумовить зміщення важеля 2 і зміну розміру зазору δ між заслінкою 6 і соплом 7, а також до відповідної зміни вихідного сигналу $P_{ВИХ}$. У сильфоні ЗЗ 4 сформується сила ЗЗ $N_{З.З} = F_{еф} \cdot P_{ВИХ}$ (де Феф − ефективна площа сильфона 4), момент якої $M_{З.З} = b \cdot N_{З.З}$ спрямовуватиметься проти моменту МВХ. Рух важеля 2 припиниться, коли ці моменти зрівняються, і система нового стану рівноваги: $M_{ÂÕ} = M_{ЗЗ}$.

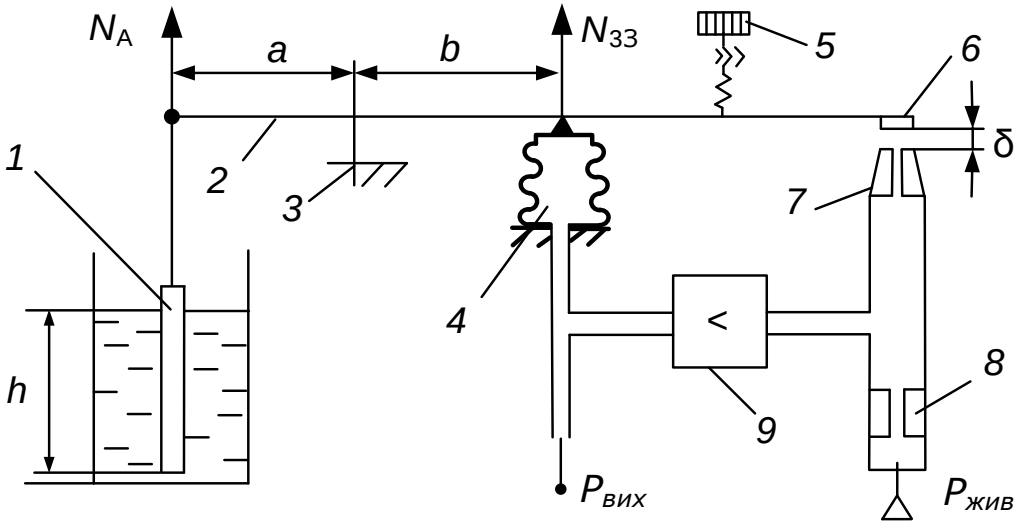


Рис. 12.16 Принципова схема буйкового рівноміра із пневматичним вихідним сигналом:

1 − буйок; 2 − важіль; 3 − гнучка опора; 4 − сильфон зворотного зв'язку; 5 − коректор нуля; 6,7,8 − заслінка, сопло і постійний пневмодросель механопневматичного перетворювача типу «сопло-заслінка»; 9 − пневмопідсилювач

Звідси $a\rho_p S_A hg = b \cdot N$, а отже, $\rho_{ВИХ} = kh$,

де $k = \dfrac{a\rho_p S_Б hg}{bN_{3.3}}$; ρ_P − густина рідини; $S_Б$ − площа поперечного перерізу буйка; g − прискорення сили тяжіння.

Завдання 2. Вивчити принцип дії та скласти функціональну схему вимірювального перетворювача зрівноважувального перетворення.

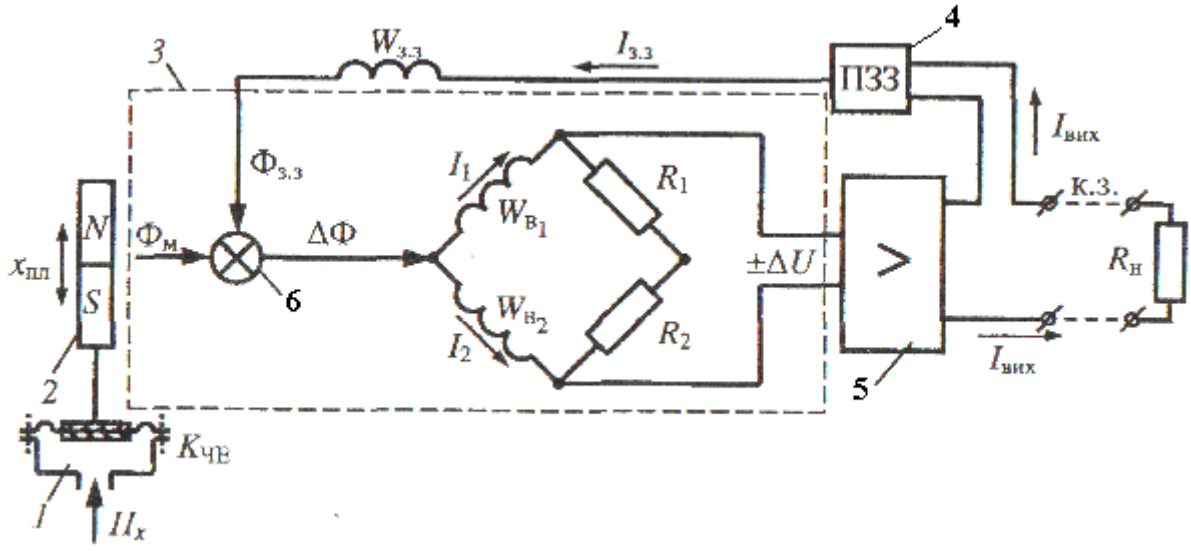


Рис. 12.17 Структурна схема магнітомодуляційного перетворювача:

1 – чутливий елемент; 2 − магнітний плунжер; 3 – магнітний перетворювальний пристрій; 4 − пристрій зворотного зв'язку; 5 − напівпровідниковий підсилювач; 6 − компаратор; к. з. − канали зв'язку

Принципова електрична схема перетворювача (рис. 12.17) містить: чутливий елемент 1, що перетворює вхідний параметр $П_x$ (наприклад, тиск) у лінійне переміщення плунжера $x_{ПЛ}$; магнітний плунжер 2, що перетворює переміщення $x_{ПЛ}$ у керуючий магнітний потік $Ф_м$; магнітний перетворювальний пристрій 3, призначений для перетворення різниці магнітних потоків $\Delta Ф = Ф_м - Ф_{ЗЗ}$, створюваних постійним магнітом 2 та струмом ЗЗ $I_{ЗЗ}$ (в обмотці $W_{ЗЗ}$), в електричний сигнал ΔU; ПЗЗ 4, що дає змогу встановити потрібний закон перетворення; напівпровідниковий ПП 5, що перетворює ΔU у вихідний сигнал постійного струму $I_{ВИХ}$ = 0...5 мА; компаратор (пристрій порівняння) 6, що формує різницю магнітних потоків $\Delta Ф = Ф_м - Ф_{ЗЗ}$.

Завдання 3. Вивчити принцип дії та скласти функціональну схему вимірювального перетворювача зрівноважувального перетворення. Робота електросилового перетворювача, схему якого зображено на рис. 12.18, ґрунтується на принципі силової компенсації вхідного зусилля R_x протидією зусилля ЗЗ $R_{ЗЗ}$.

У разі появи чи збільшення R_x $Т$-подібний важіль 1 почне обертатися проти годинникової стрілки, зміщуючи $Г$-подібний важіль 4, а також плунжер 5 індикатора розузгодження 6 униз, що спричинить збільшення струму $I_{ВИХ}$ на виході ПП 7.

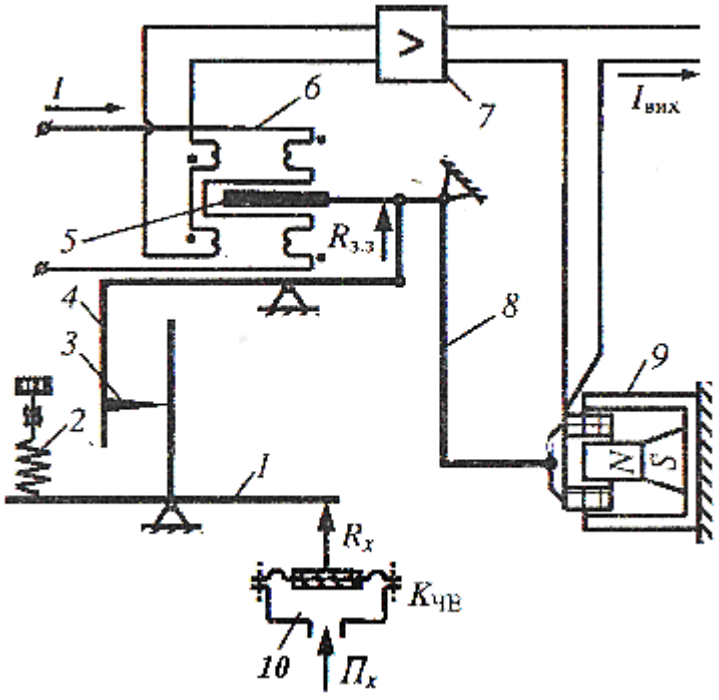


Рис. 12.18 Принципова схема уніфікованого перетворювача «сила − струм»:
1,4,8 − важелі; 2 − коректор нуля; і 3 − рухома опора; 5 − плунжер; 6 − індикатор розузгодження; 7 − підсилювач; 9 − магнітоелектричний перетворювач

Під дією струму рухома котушка магнітоелектричного перетворювача 9 виштовхуватиметься з магнітопроводу (для використання котушки, яка

втягується в магнітопровід, її слід розмістити ліворуч від важеля 8), формуючи зусилля ЗЗ R_{33}, яке поверне плунжер 5 майже до попереднього положення.

Діапазон вимірювання регулюють переміщенням рухомої опори 3 а настроювання нуля – змінюванням зусилля пружини коректора нуля 2.

Теоретичні відомості

Вигляд функціональних схем ВП однозначно залежить від реалізованих у них методів перетворення, зокрема методів прямого та зрівноваженого перетворень.

Вимірювальний перетворювач, що реалізує метод *прямого перетворення*, за якого сигнал вимірювальної інформації рухається весь час в одному напрямку (від входу до виходу), можна подати функціональною схемою (рис.12.19).

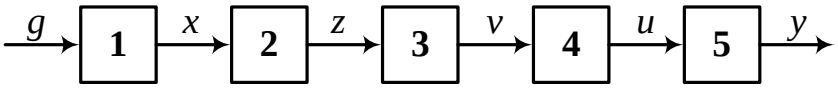


Рис. 12.19 Функціональна схема вимірювального приладу прямого перетворення:

1 – первинний вимірювальний перетворювач; 2 − проміжний вимірювальний перетворювач; 3 − проміжний (передатний) перетворювач; 4 − вимірювальний механізм; 5 − демонстраційний пристрій

Функціональні елементи цієї схеми, на кожному з яких відбувається певне перетворення вимірювальної інформації, називаються *вимірювальними перетворювачами (ВП)* (іноді – *перетворювальними елементами*), а сукупність сполучених між собою вимірювальних перетворювачів, розміщених між вхідним *X* і вихідним *Y* сигналами, − *вимірювальним колом (ВК)*. Назви елементів функціональної схеми залежать від виконуваних функцій та місця, де вони розміщені у вимірювальному колі.

ВП 1, який першим взаємодіє з об’єктом вимірювання, називають *первинним вимірювальним перетворювачем* (ПВП). Перший елемент ПВП – чутливий перетворювальний елемент, який безпосередньо сприймає вхідну фізичну величину, зазвичай називають просто чутливим елементом (ЧЕ). У найпростішому ПВП може бути один ЧЕ. У такому випадку ПВП може складатися тільки з ЧЕ та додаткових елементів, потрібних для його закріплення на об'єкті, електричного з’єднання з іншими технічними пристроями АС, захисту від дії небезпечних зовнішніх чинників тощо.

До складу ПВП можуть входити кілька перетворювальних елементів, а також інші, супутні їм допоміжні елементи (електричні, електромеханічні, механічні), які забезпечують виконання ПВП його функцій призначення, зокрема, його взаємодію з об'єктом та іншими технічними пристроями

(наприклад, з вимірювальним приладом, циклом або системою, регулятором, ЕОМ тощо).

Вихідний сигнал ПВП має бути зручним для використання, а саме: для передачі на відстань, запам'ятовування, обробки, подальших перетворень, вимірювання, контролю, керування іншими технічними пристроями через дію на них тощо. Натомість, ЧЕ часто перетворюють фізичну величину у вихідний параметр, який не може бути використаним для названих операцій (наприклад, у різноманітних пружинних ЧЕ – це лінійне чи кутове переміщення або зусилля, щодо яких вживання терміну «сигнал» навряд чи є доречним).

Наступний за ПВП перетворювач (їх може бути кілька, або не бути зовсім; на поданій схемі − перетворювач 2) називається *проміжним перетворювачем.* До проміжних належать і *передатні перетворювачі*, призначені забезпечувати передачу сигналів на відстань (на схемі – перетворювач 3). *Вимірювальний механізм* 4 – це частина елементів конструкції аналогового вимірювального приладу, взаємодія яких зумовлює потрібне переміщення покажчика. *Показувальний (відліковий) пристрій* 5 – це сукупність елементів вимірювального приладу, яка подає візуальний сигнал вимірюваної інформації.

Аналогові вимірювальні прилади забезпечують формування аналогових показів, цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) – цифрових. Частину показувального пристрою, положення якого відносно поділок шкали визначає покази аналогового вимірювального приладу, називають *покажчиком.* Його може бути виконано у вигляді рухомих відносно шкали стрілки, променя світла, пера самописця, поверхні рідини (ртутний термометр, двотрубний дифманометр і т. ін.). А сукупність елементів засобу вимірювання, що реєструє (на носії) сигнал вимірювальної інформації, називають *реєструвальним пристроєм.* Як і показувальні пристрої, реєструвальні також поділяють на аналогові (перо самописця залишає слід на діаграмному папері) та цифрові (інформація виводиться на принтер).

Прикладом будови вимірювального приладу прямого перетворення може бути монометричний термометр, принципову схему якого подано на рис. 12.20.

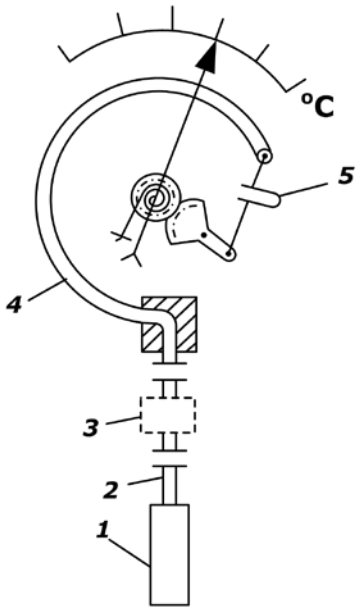


Рис. 12.20. Принципова схема газового або рідинного манометричного термометра:

1 − термобалон; 2 − капіляр; 3 − пристрій дистанційного передавання тиску; 4 − манометрична пружина; 5 − пружинниий термокомпенсатор

Принцип дії манометричних термометрів (МТ) ґрунтується на вимірюванні тиску робочої (термометричної) речовини в замкнутому об'ємі термосистеми під час зміни її температури (за умови незмінного об'єму).

Термосистема МТ (див. рис.12.20) складається з термобалона 1, капіляра 2 і трубчастої пружини 4 вимірювача тиску, оснащеного пружинним термокомпенсатором 5. Зміна температури в об'єкті вимірювання змінює тиск у термобалоні 1, який через капілярну трубку 2 передається на манометричну пружину 4 вимірювача тиску. Під дією тиску вільний кінець пружини переміщується, що призводить до переміщення стрілки відносно шкали манометричного термометра.

Геометричні розміри термобалона (виробляється з латуні чи спеціальних сталей) залежать від типу та призначення МТ: діаметр 5 − 30 мм, довжина 60−500 мм. Капіляр являє собою мідну чи сталеву трубку з внутрішнім діаметром 0,1−0,5 мм і завдовжки до 60 м (для передавання сигналу МТ на більшу відстань застосовують пристрої дистанційного передавання тиску 3 – зазвичай це безшкальні дифманометри ІЗДД11 з пневматичним вихідним сигналом).

За виглядом речовини, якою заповнено термосистему, МТ поділяють на газові, рідинні та конденсаційні.

МТ властиві такі види похибок:

барометрична − визначається впливом коливань атмосферного тиску на манометричну пружину вимірювача тиску;

гідростатична − визначається різною висотою розміщення термобалона та вторинного перетворювача (має істотне значення тільки для рідинних та конденсаційних МТ);

температурна − визначається впливом температури навколишнього повітря на зміну об'єму термосистеми (капіляра та манометричної пружини).

Загальні вади МТ − необхідність частої (через можливість розгерметизації термосистеми) перевірки, складність ремонту (важко знайти мікротріщину в капілярі), інерційність, великі габарити термобалона (особливо в газових МТ).

Динамічні властивості манометричних термометрів можна подати у вигляді передатної функції:

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-\tau s}, \qquad (12.27)$$

де k − коефіцієнт перетворення; T і τ − стала часу та час запізнення відповідно (значення T і τ подано в табл. 12.9).

Таблиця 12.9

Динамічні властивості манометричних термометрів

Умови визначення характеристик	T, с	τ, с	T/τ
Нагрівання від 30 до 100 °С у баку з водою	1	8	0,12
Нагрівання від 40 до 60 °С у потоці повітря (швидкість 8 м/с)	2	12	0,17

Функціональну схему вимірювального приладу зрівноважувального перетворення можна подати у вигляді, зображеному на рис.12.21.

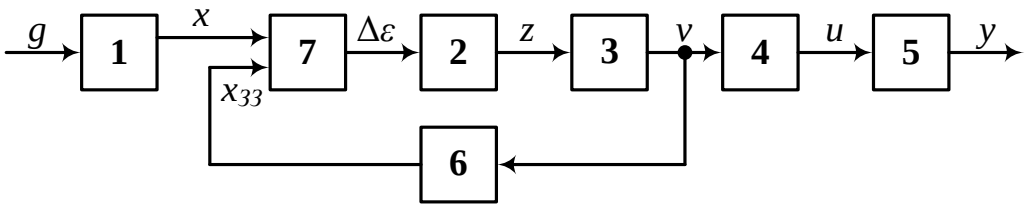


Рис. 12.21 Функціональна схема вимірювального приладу зрівноважувального перетворення:

1 − первинний вимірювальний перетворювач; 2 − проміжний вимірювальний перетворювач; 3 − проміжний (передатний) перетворювач; 4 − вимірювальний механізм; 5 − показувальний пристрій; 6 − пристрій зворотного зв’язку; 7 – компаратор

Характерною ознакою таких приладів є наявність ЗЗ − зазвичай від'ємного. При цьому вихідний сигнал деякого з елементів «повертається» у

зворотному напрямку та подається на вхід одного з попередніх елементів. Але для цього вихідному сигналу перетворюваного елемента потрібно надати такої форми, яку сприймає вхід вказаного попереднього елемента, тобто слід провести зворотне перетворення сигналу вимірювальної інформації (на поданій схемі сигнал вигляду W зворотно перетворюється в сигнал вигляду x_{33}, який називають сигналом зворотного зв'язку). Ця операція реалізується за допомогою спеціального перетворювача 6, що має назву *пристрою зворотного зв'язку* (ПЗЗ). Попри це, схема має ще один новий елемент − компаратор 7, який виконує порівняння двох величин (x і x_{33}).

Схема працює так. Сигнал x, що виникає на виході ПВП, потрапляє на один із входів компаратора 7, на другий вхід якого подається з протилежним знаком величина x_{33} (компенсуючий або зрівноважувальний сигнал), сформована ПЗЗ 6. У результаті їх порівняння на виході компаратора 7 формується сигнал $\Delta\varepsilon$, пропорціональний різниці $x - x_{33}$. Цей сигнал потрапляє в проміжний перетворювач 2, вихідний сигнал якого (якщо таких проміжних перетворювачів декілька, − то з виходу останнього) надходить у вимірювальний механізм 4 і одночасно на вхід ПЗЗ 6.

Залежно від типу проміжного перетворювача 2 за кожного значення вимірювальної величини різниця $x - x_{33}$, що надходить на його вхід від компаратора 7, може або зводитись до нуля (у пристроях з автоматичною автокомпенсацією, наприклад, в автоматичних мостах та потенціометрах), або мати деяке мале значення, пропорційне вимірювальній величині (у пристроях зі статичною автокомпенсацією як, наприклад, у нормуючих перетворювачах).

Прикладом будови вимірювального приладу зрівноважувального перетворення може бути буйковий рівномір із уніфікованим вихідним струмовим сигналом 0 − 5 або 0 − 20 мА, принципову схему якого зображено на рис. 12.23

На таких самих принципах, тобто з реалізацією цих самих методів вимірювання, ґрунтуються й *вимірювальні перетворювачі.* (див. рис. 12.22, *а*, *б*).

У вимірювальних перетворювачах вимірювального механізму та відлікового пристрою немає, оскільки у них немає потреби. Водночас, до складу вимірювального перетворювача зазвичай входить кінцевий перетворювач 8, який зводить вихідний сигнал до уніфікованої форми, придатної для передачі, зберігання та оброблення.

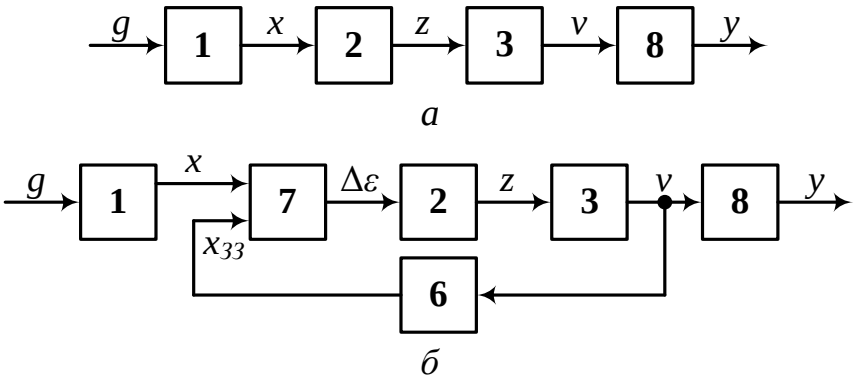


Рис. 12.22. Функціональна схема вимірювальних перетворювачів прямого (*а*) та зрівноважувального (*б*) перетворень:

1 − первинний вимірювальний перетворювач; 2 − проміжний вимірювальний перетворювач; 3 − проміжний (передатний) перетворювач; 6 − пристрій зворотного зв’язку; 7 − компаратор; 8 − кінцевий перетворювач

Методичний приклади виконання завдання практичного заняття

Завдання 1. Вивчити принцип дії та скласти функціональну схему вимірювального приладу зрівноважувального перетворення [28]**.**

Розв’язання. Принцип дії буйкового рівноміра зрівноважувального перетворення (див. рис.12.23) полягає у такому. Якщо занурити буйок 1 у контрольовану рідину, на нього діятиме виштовхувальна сила F_x, що переміщує буйок. Це переміщення за допомогою коромисла 2 спричиняє повертання осердя 4 диференціально-трансформаторного перетворювача (ДТП). Нерухому частину магнітопроводу виконано у виді Ш-подібного осердя 5. На його середній стрижень намотано первинну намагнічувальну обмотку, що живиться від джерела змінної напруги. Дві ідентичні вимірювальні обмотки, намотані на крайні стрижні, утворюють два ідентичні перетворювальні елементи. Обмотки з'єднані послідовно та зустрічно.

ДТП побудований так, що за нульового значення вимірюваного рівня чи деякого його номінального значення рухоме осердя 4 займає симетричне відносно обох перетворювальних елементів положення, подані в них ЕРС будуть однаковими, а їх різниця дорівнюватиме нулю. Змінення вимірюваного рівня та відповідне переміщення рухомого осердя 4 змінюють потоки в окремих перетворювальних елементах і подані в них ЕРС. З'являється певна різниця ЕРС, що подається на ПП 6, вихідна напруга якого після перетворення змінного струму в постійний надходить до вимірювальної обмотки зворотного магнітоелектричного перетворювача.

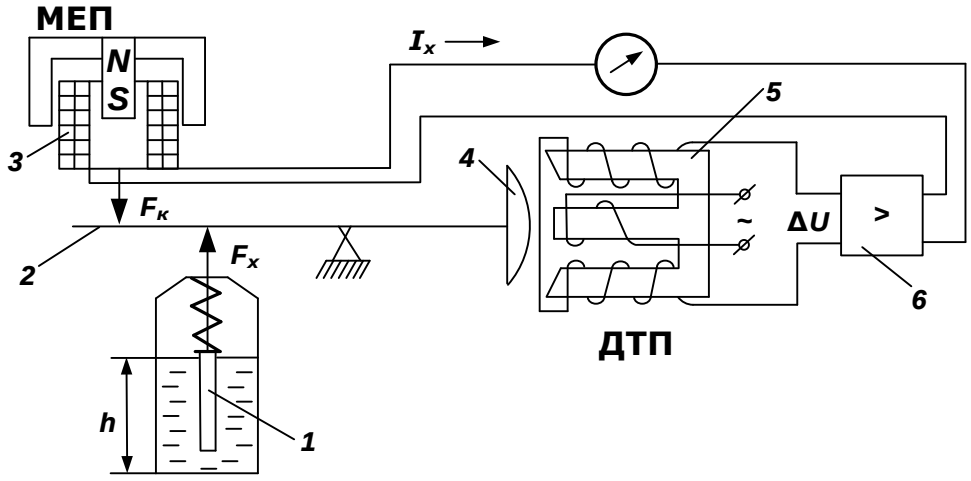


Рис. 12.23 Принципова схема буйкового рівноміра зрівноважувального перетворення:

1 − буйок; 2 − коромисло; 3 − вимірювальна обмотка магнітоелектричного перетворювача (МЕП); 4 − рухоме осердя диференціальнотрансформаторного перетворювача; 5 − нерухома частина магнітопроводу диференціально-трансформаторного перетворювача; 6 – підсилювач

Струм I_x, що проходить через вимірювальну обмотку 3, взаємодіючи з полем постійного магніту, створює компенсаційне зусилля $F_к$, спрямоване назустріч виштовхувальній силі F_x, яка діє на буйок 1. Значення струму I_x, який проходить у момент рівноваги цих сил, буде мірою вимірюваного рівня h.

Функціональні елементи та структурна функціональна схема вимірювального приладу зрівноважувального перетворення. Виходячи з принципу дії заданого перетворювача, знаходимо його функціональні елементи, подані у табл. 12.10.

Таблиця 12.10

Функціональний склад вимірювального перетворювача

Порядковий номер	Функціональний елемент	Вхідний сигнал	Вихідний сигнал	Технічна реалізація
1	Первинний вимірювальний перетворювач − **ЧЕ**	Рівень рідини $\boldsymbol{h}$	Зусилля $\boldsymbol{F_x}$	Буйок 1
7	Порівнювальний елемент (компа-ратор) − **ПЕ**	Зусилля $\boldsymbol{F_x}$ Компенсаційне зусилля $\boldsymbol{F_к}$	Кутове переміщення осердя 4 φ	Важіль−коромисло 2
2	Вторинний перетворювач	Кутове переміщення осердя 4 φ	Напруга Δ $\boldsymbol{U}$	ДТП
			Струм $\boldsymbol{I}$	Підсилювач

3	Підсилювач	Напруга ΔU		постійного струму - ППС
6	Пристрій зворотного зв'язку − ПЗЗ	Струм I	Компенсаційне зусилля $F_к$	Магнітоелектрич-ний перетворю-вач − МЕП
4	Реєструвальний пристрій	Струм I	Рівень h	Показувальний (відліковий) пристрій

На основі табл. 12.10. складаємо функціональну структурну схему вимірювального перетворювача (рис.12.24).

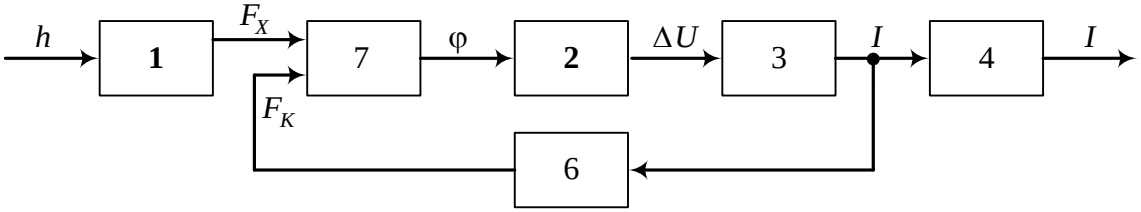


Рис. 12.24. Функціональна структурна схема вимірювального перетворювача:

1 − чутливий елемент; 2 − вторинний перетворювач; 3 − підсилювач; 4 − реєструвальний пристрій; 6 − магнітоелектричний перетворювач; 7 – компаратор

Завдання 2. Вивчити принцип дії та скласти функціональну схему вимірювального перетворювача прямого перетворення.

Розв'язання. Принципову схему п'єзоелектричного перетворювача прямого перетворення подано на рис.12.25.

В основу принципу дії п'єзоелектричного перетворювача покладено відкрите братами Жаком і П'єром Кюрі в 1880 р. явище прямого *п'єзоелектричного ефекту,* що полягає в появі електричних зарядів на поверхні деяких кристалів (кварцу[1], сегнетової солі, турмаліну, титанату барію тощо; частіше використовують кварц через його малу температурну чутливість) під впливом механічних напружень, які виникають у них під дією прикладених зусиль.

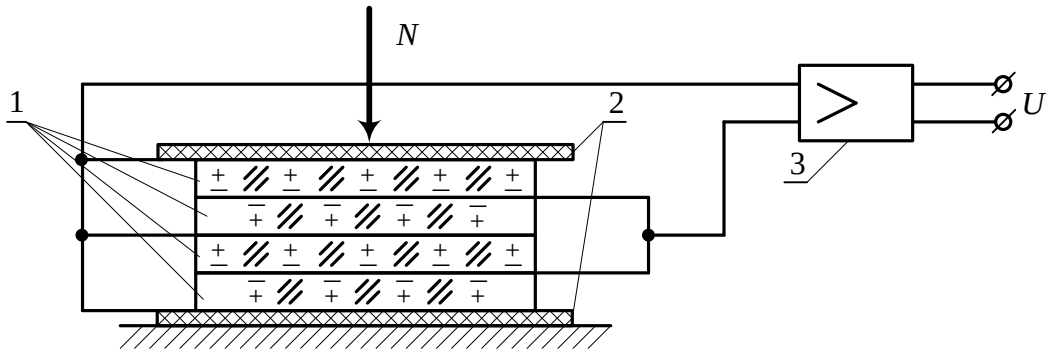


Рис. 12.25 Принципова схема п'єзоелектричного перетворювача:

1 − пластинки кварцу; 2 − ізолятори;
3 − вихідний перетворювач-підсилювач

Обернений ефект (якщо, наприклад, до кварцової пластини підвести змінну напругу високої частоти, то вона здійснюватиме коливання відповідної частоти) називають явищем електрострикції.

Значення заряду Q (на різних поверхнях пластин 1, які являють собою паралельно з'єднані − механічно і електрично − стовпчики кварцу діаметром 5 мм завтовшки 1 мм, з'являються заряди різних знаків) зв'язане з прикладеною силою N відношенням:

$$Q = kN, \qquad (12.28)$$

де k − п’єзоелектрична стала, її значення не залежить від розмірів пластини і визначається природою кристала (для кварцу, наприклад, $k = 2{,}1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н).

Зовнішні грані стовпчика з кварцевих пластин 1 ізолюються від корпуса перетворювача ізоляторами 2, а внутрішні – самим кварцом із дуже високим електричним опором. Завдяки накладеним на поверхню кристала металевим (фольговим) обкладинкам, які є конденсатором, електричний заряд перетворюється в електричну напругу:

$$U = Q / C = kN /(C_0 + C_П), \qquad (12.29)$$

де C_0 і $C_П$ − ємності кварцу та провідників.

Функціональні елементи та структурна функціональна схема вимірювального перетворювача прямого перетворення. Виходячи з принципу дії заданого перетворювача знаходимо його функціональні елементи, подані у табл. 12.11.

Таблиця 12.11

Функціональний склад вимірювального перетворювача

Порядковий номер	Функціональний елемент	Вхідний сигнал	Вихідний сигнал	Технічна реалізація
1	Первинний вимірювальний перетворювач - ЧЕ	Зусилля ***N***	Напруга ***U***	П’єзоелектричний перетворювач
2	Проміжний (передавальний) перетворювач	Напруга ***U***	Напруга ***U***	Підсилювач

На основі табл. 12.11. складаємо структурну функціональну схему вимірювального перетворювача (рис.12.26).

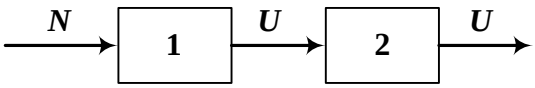


Рис. 12.26. Структурна функціональна схема вимірювального перетворювача (приладу):
1 − чутливий елемент; 2 – підсилювач

Як видно зі схем п'єзоелектричних чутливих перетворювальних елементів (рис.12.27), п'єзоефект[1] може бути поздовжнім і поперечним залежно від орієнтації п'єзоелектрика.

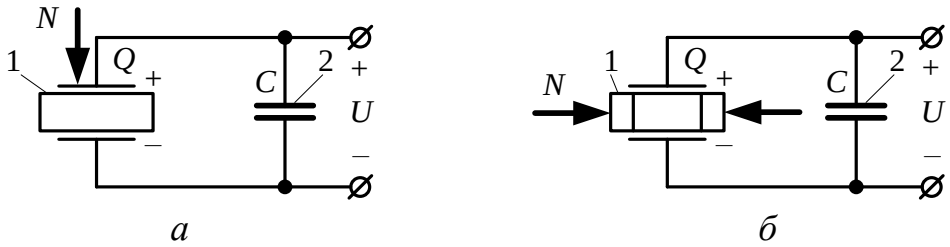


Рис. 12.27. Схеми п'єзочутливих перетворювальних елементів з поздовжнім (а) та поперечним (б) п'єзоефектами:
1 – п'єзокристал; 2 – конденсатор

П'єзоелектричні перетворювачі – це перетворювачі генераторного типу. Вони потребують підключення ПП із якомога більшим вихідним опором (від 10 Ом і вище). Ці перетворювачі можна використовувати тільки для швидкозмінних величин (змінних зусиль, пульсацій тисків, вібрацій, прискорень тощо), тому для вимірювання статичних величин вони непридатні. Похибка становить 1…3 % від верхньої межі діапазону вимірювання.

За температури точки Кюрі (для кварцу це 500 °С) у нього зникає п'єзоефект.

Серед переваг п'єзоелектричних перетворювачів можна виокремити можливість застосування для вимірювання найбільших тисків і зусиль, широкий температурний діапазон, мінімальні пружні деформації, високі динамічні характеристики та чутливість, серед вад – потребу в забезпеченні дуже високого опору ізоляції, непридатність до статичних вимірювань.

Завдання на самостійну роботу

Завдання на самостійну роботу складається із трьох варіантів.

Завдання 1 є першим варіантом. Його виконують студенти з номером від 1 до 10 за списком групи;

Завдання 2 є другим варіантом. Його виконують студенти з номером від 11 до 20 за списком групи;

Завдання 3 є третім варіантом. Його виконують студенти з номером від 21 до 30 за списком групи.

Відповідно до свого варіанта:

1. Вивчити теоретичні положення, які стосуються функціонального складу ВП.

2. Вивчити принцип дії та скласти функціональну схему ВП.

Варіанти завдань на самостійну роботу

Завдання 1. ВП прямого перетворення [28]**.**

Схему частотного індуктивного тахометра (індуктивного імпульсного перетворювача) показано на рис.12.28. Вимірювальним елементом перетворювача є стальний диск 1 із зубцями. Під час обертання диска зубці проходять у робочому зазорі З котушок індуктивності 2, увімкнених у контур високочастотного транзисторного генератора *Г*.

За наявності в зазорі зубця різко погіршується добротність контуру через внесені активні втрати, і відбувається зрив коливань генератора. Коли зубець виходить із зазору, ВЧ-коливання відновлюються. Тож відповідній швидкості чергування зубців і впадин диска відповідає певна частота «пачок» ВЧ-коливань, які після підсилення детектуються формувачем імпульсів *Ф* у вигляді однополярних коротких імпульсів. Роздільна здатність давача − близько 500 імпульсів за оберт.

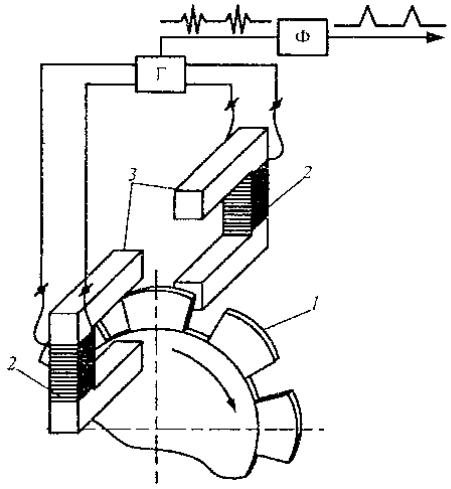
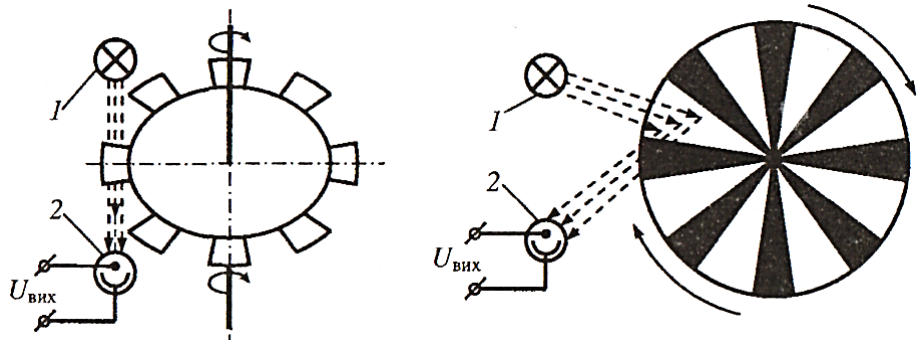


Рис. 12.28. Схема частотного індуктивного тахометра:
1 − диск із зубцями; 2 − котушки індуктивності; 3 − робочий зазор

Завдання 2. Фотоелектричні імпульсні перетворювачі. Принцип дії фотоелектричних імпульсних перетворювачів ґрунтується на явищі фотоефекту: внутрішнього (змінюється опір напівпровідника – це фоторезистор) чи зовнішнього (змінюється емісія електронів з катода – це фотодіод). Для побудови фотоелектричного перетворювача достатньо розмістити поблизу вала, швидкість якого вимірюється, джерело випромінювання (освітлювач) 1 і фотоелемент 2 (приймач), а на валу закріпити диск із зубцями (рис. 12.28, а) або нанести (фарбою чи іншим способом) мітки (рис. 12.28, б), коефіцієнт відбиття яких відрізнявся би від коефіцієнта відбиття диска. Тоді частота імпульсів

$$f = mn, \qquad (12.30)$$

де m − кількість зубців (міток з різними коефіцієнтами відбиття) диска; n − кількість обертів диска.



а *б*

Рис. 12.29. Схеми фотоелектричних імпульсних перетворювачів:
а − із диском з зубцями; *б* − із диском з мітками;
1 − освітлювач; 2 – приймач

Фотоелектричні імпульсні перетворювачі вирізняються відсутністю гальмівного моменту, простотою конструкції, мініатюрністю.

Завдання 3. Вимірювальний перетворювач прямого перетворення.

ДТП перетворюють лінійне переміщення на електричний сигнал. Змінний параметр цих перетворювачів – значення взаємної індуктивності між обмотками. Їх широко застосовують у первинних приладах (манометрах, дифманометрах, ротаметрах та ін.) як передатні, а у вторинних приладах – як компенсаційні.

Такий перетворювач являє собою індуктивну котушку, яка складається з первинної обмотки 1 (рис.12.30), що живиться змінною напругою U, та двох секцій вторинної обмотки (їх часто називають вторинними обмотками) 3 і 4, ввімкнених диференціально (зустрічно). Між ними розміщено рухоме у вертикальній площині феромагнітне осердя (плунжер) 2, виготовлене з чистого заліза, що має мінімальну ширину гістерезисної характеристики намагнічування. Це дає змогу мінімізувати варіацію самого перетворювача.

Плунжер переміщує будь-який ЧЕ, здатний перетворювати вимірювальний параметр $П_x$ у лінійне зміщення x (наприклад, сильфон, поплавець ротаметра, труба Бурдона тощо).

Створюваний первинною обмоткою магнітний потік індукує у вихідних обмотках ЕРС e_1 і e_2, значення яких залежить від струму живлення первинної обмотки i_1, його частоти f та взаємних індуктивностей M_1 і M_2 між вторинними обмотками та первинною:

$$e_1 = 2\pi f i_1 M_1;$$
$$e_2 = 2\pi f i_1 M_2.$$

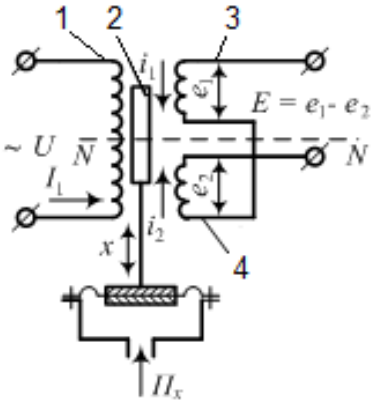


Рис. 12.30 Принципова електрична схема диференціально-трансформаторного перетворювача:

1 − первинна обмотка; 2 − феромагнітне осердя;
3, 4 − секції вторинної обмотки

У разі зустрічного ввімкнення секцій 3 та 4 загальна (вихідна) ЕРС вторинної обмотки $E = e_1 - e_2 = 2\pi f\, i_1 M$, де f − частота струму i_1; $M = M_1 - M_2$ − взаємна індуктивність між первинною та вторинною обмотками.

Розглянуті ДТП неуніфіковані (невзаємозамінні), тому вимірювальні комплекти, що складаються з ПВП та вторинного приладу з такими перетворювачами, потребують індивідуального градуювання.

Завдання 4. Вимірювальний перетворювач прямого перетворення.

Уніфіковані ДТП (рис.12.31) мають у вихідній обмотці дільник напруги,

що складається з регульованого R_1 та R_2 резисторів, які забезпечують налаштування номінального ходу ДТП, встановлених у вторинних приладах (зміною опору R_1 можна змінювати межі вимірювання на ±25%). Окрім того, вони обладнані коректором нуля (КН), який містить додаткову обмотку (ДО) та регулювальний резистор R_3. Номінальний робочий хід плунжера в уніфікованих ДТП становить (залежно від типу перетворювача) 1,6, 2,5 або 4 мм (у неуніфікованих – 4 … 35мм), що відповідно впливає на їх габарити.

Для уніфікованого ДТП з дільником у вихідній обмотці вихідний сигнал $U_{ВИХ}$, який визначається взаємною індуктивністю між первинною обмоткою та вихідним ланцюгом перетворювача, становитиме:

$$U_{ВИХ} = 2\pi f\, i_1 M. \qquad (12.31)$$

Значення взаємної індуктивності M пов’язано з переміщенням x плунжера 6 залежністю:

$$M = M_{\max}\left(x / x_{\max}\right)e^{-j\varphi}. \qquad (12.32)$$

де $M_{\max}$ − найбільше значення взаємної індуктивності між первинною обмоткою та вихідним колом перетворювача, яке відповідає максимальному $x_{\max}$ переміщенню плунжера; x − переміщення плунжера від нейтралі; φ − аргумент вектора взаємної індукції.

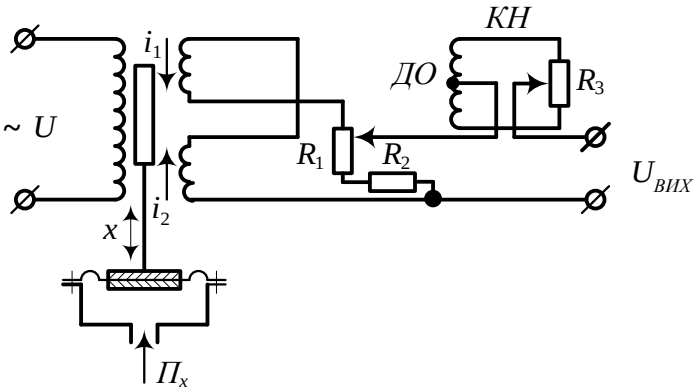


Рис. 12.31 Принципова електрична схема ДТП з уніфікованим сигналом

Таким чином,

$$U_{ВИХ} = 2\pi f I_1 M_{\max}\left(x / x_{\max}\right) \cdot e^{-j\varphi}, \qquad (12.33)$$

тобто за усталених значеннь решти параметрів, що входять до останнього виразу, вихідний сигнал ДТП визначається переміщенням x плунжера.

Контрольні запитання

1. Які методи перетворення існують при вимірюванні фізичних параметрів?

2. Що розуміють під вимірювальним перетворювачем?

3. Що розуміють під первинним вимірювальним перетворювачем?

4. Наведіть функціональну схему вимірювального перетворювача прямого методу перетворення і поясніть склад її функціональних елементів.

5. Наведіть функціональну схему вимірювального перетворювача зрівноважувального методу перетворення і поясніть склад її функціональних елементів.

6. Чи є різниця за складом функціональних елементів між вимірювальним приладом і вимірювальним перетворювачем? Як що є, то у чому вона полягає?

7. Чи є різниця за складом функціональних елементів між вимірювальним перетворювачем прямого методу перетворення і вимірювальним перетворювачем зрівноважувального методу перетворення? Як що є, то у чому вона полягає?

8. Яким чином у вимірювальному перетворювачі здійснюється уніфікація сигналу?

ЛІТЕРАТУРА

1. Алиев Т.М, Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника: Учеб. пособие для техн. вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.
2. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога: Пер. с англ. – М.: Издат. дом «Додэка-XXI», 1992. – 384 с.
3. Вакулин А.А., Шабаров А Б. Диагностика теплофизических параметров в нефтегазовых технологиях: Монография. – Новосибирск: Наука, 1998. – 249 с.
4. Головко Д.Б., Рего К. Г., Скрипник Ю.О. Основи метрології та вимірювань. – К.: Либідь, 2001. – 408 с.
5. Головко Д. Б., Скрипник Ю.О., Яненко О.П. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин: Навч. посіб. – К.: Либідь, 2003. – 328 с.
6. ГОСТ 8.563-97. Межгосударственный стандарт: ГОСТ 8.563.1-97. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия; ГОСТ 8.563.2-97. Методика выполнения измерения с помощью сужающих устройств; ГОСТ 8.563.3-97. Процедура и модуль расчетов. Программное обеспечение. – Чинний від 24.04.2001. – К.: Держстандарт України, 2001.
7. Грушка І.Г. Методи і засоби вимірювання вологості матеріалів та середовищ / Наук. праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту, Київ.- 2005, Вип. 254.-С169-187.
8. Датчики измерительных систем: В 2 кн. / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон и др.: Пер. с франц. / Под ред. А. С. Обухова. – М.: Мир, 1992.
9. Датчики: Справочник / З. Ю. Готра, Л. Я. Ильницкий, Е. С. Полищук и др. / Под ред. З.Ю. Готры, О.И.Чайковского. – Л.: Каменяр, 1995. – 312с.
10. ДСТУ 2681-94.Метрологія. Терміни та визначення. – Чинний від 26.07.1994. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68 с.
11. ДСТУ 2837-94. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення. – Чинний від 31.10.1994. – К.: Держстандарт України, 1995. –221 с.
12. ДСТУ 2858-94. Термоперетворювачі опору. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. – Чинний від 23.11.1994. – К: Держстандарт України, 1995. – 53 с.
13. ДСТУ 3307-96. Перетворювачі термоелектричні. Подовжувальні та компенсаційні проводи. Допуски та система ідентифікації. – Чинний від 27.02.1996. – К.: Держстандарт України, 1998. – 6 с.
14. Дж. ФРАЙД. Сучасні датчики. Довідник - М.: Техносфера, 2005. - 592 с.
15. Ефимов В.Т., Молчанов В.И., Ефимов А.В. Методы расчетов в автоматизации химико-технологических и теплоэнергетических процессов: Учеб, пособие для вузов. – Х.: ХГПУ, 1998. – 316 с.
16. Измерение температур в технике: Справочник / Г. Бройнинг, П. Дитрих,

В. Глокман и др.: Пер. с нем. / Под общ. ред. Ф. Линевега. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.
17. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб, пособие для вузов / Н.Н. Евтихиев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров; Под общ. ред. Н. Н. Евтихиева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
18. Измерения в промышленности: Справоч. изд.: В 3 кн.: Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990.
19. Й. Й. Білинський, К.Ю. Іоніна Світловодні сенсори температури точки роси природного газу:монографія / Вінниця: ВНТУ, 2014. – 136 с.
20. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики: Учеб. для сред. спец. Учеб. заведений. – М.: Высш. шк., 1991. – 304 с.
21. Климентовський Ю.А. Технічні засоби автоматики: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / Климентовський Ю.А., Лавінський Д.С. – К.: «Видавничий центр НАУ», 2002. – 57 с.
22. Коваленко І.О., Коваль А.М.Метрологія та вимірювальна техніка: Навч. посіб. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 652 с.
23. А. с. № 1516811 СССР, МКИ G 01 L 7/00. Устройство для измерения гидростатического давления жидких нефтепродуктов в резервуарах / Ю. В. Крекотень, М. В. Лукинюк, Н.Р. Буголовский и др. (СССР). – Заявл. 18.02.88. Опубл. 23.10.89, Бюл. №39. – С. 28.
24. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества вещества: Справочник: В 2 кн. – СПб.: Политехника, 2002.
25. Кубрак А.І. Жученко А. І., Кваско М.З. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем: Навч. посіб. – К.: Політехніка, 2004.424 с.
26. Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств: Учеб. пособ. для студ. вузов. – М.: Машиностроение, 1983. – 464 с.
27. Коломієць Г.Г. Фізичні основи сенсорики. Конспект лекцій для студентів ЗДІА/Запоріжжя, 2014.-64с.
28. Лисенко В.П. Основи автоматики: теорія і практика (ч.1). Видання 2-е, перероблене і доповнене / Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К.: «Освіта України», 2013. – 720 с.
29. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 535 с.
30. Методы конструирования измерительных систем / А. Н. Дубовец, Б. Г. Лях, Н. Н. Товажнянский, И. И. Литвиненко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – 160 с.
31. Матус С.К. Інформаційно-вимірювальна система збору даних і контролю за волого запасами грунту./Вісник НУВГтаП, вип.2(66), серія «Технічні науки», Рівне, 2014.с.198-208.
32. Методи і засоби агрометеорологічних вимірювань параметрів ґрунтів / Український гідрометеорологічний інститут. http://uhmi.org.ua/rozr/agro / index.php # Z15.

33. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
34. Немова Т.Н., Цветков. Н.А. Методы измерения температуры. Часть 1. Методы и средства контактного измерения температуры. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. – 38 с .
35. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування: Підруч. для студ. вищ. закл. освіти за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – К.: Задруга, 1999. – 424 с.
36 Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник. – Л.: Вид-во Держ. ун-ту «Львівська політехніка», 2000. – 360 с.
37. Промислові засоби автоматизації: Навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.; За заг. ред. А.К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХПІ», 2003 р.
38. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справ. пособие / Под ред. В.В. Черенкова – М.: Машиностроение, 1987. – 794 с.
39. Перелигін Б.В, Вельміскін Д.І. Удосконалення методів побудови систем одержання і обробки вимірювальної інформації з метою моніторингу навколишнього середовища / Одеський державний екологічний університет, Звіт про НДР, № держ. реєстр. 0113 U 000164с. 2014.-249с. http://sevntu.com.ua.
40. Романова Л.А. Метрологические основы поверки и калибровкисредств электрических измерений. – М.: АСМС, 1999. – 68 с.
41. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с копмпьютерами IBM PC: Пер. с англ. / Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – М.: Мир, 1992. – 592 с.
42. Стенцель Й.І., Тіщук В. В.Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній промисловості / Східноукраїн. держ. ун-т; Сіверськодон. технол. ін-т. – Луганськ: Вид-во СУДУ, 2000. – Ч. 1. – 263 с.
43. Стенцель Й.І. Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній промисловості / Східноукраїн. держ. ун-т; Сіверськодон. технол. ін-т. Ч. 2: Аналітичні прилади і методи контролю. – Луганськ : Вид-во СУДУ, 2001. – 263 с.
44. Теорія автоматичного управління: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Г. Ф. Зайцев, В.К. Стеклов, О.І. Бріцький; За ред. проф. Г.Ф. Зайцева. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
45. Термоелектричні прилади контролю: Навч. посіб. / В.П. Гондюл, Д.Б. Головко, Ю.О. Скрипник, Л.О. Глазков. – К.: Либідь, 1994. – 200 с.
46. Фарзане Н. Г., Илясов Л.В., Азим-заде А. Ю. Технологические измерения и прибори: Учеб. для студ. вузов, – М.: Высш. шк., 1989. – 456 с.
47. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник: Пер. с англ. / Под ред. Е. Л. Свинцова. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
48. Храмов А.В. Первинні вимірювальні перетворювачі вимірювальних иладів і автоматичних систем: Навч. посіб. – К.: Вища шк., 1998. – 527 с. 37
49. Шикалов В.С. Технологічні вимірювання:Навчальний посібник.– К.: Кондор, 2007. – 169 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК 1

ТИПИ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОПОРУ

1.1. Умовні позначення номінальних статичних характеристик термоперетворювачів опору

Залежно від номінального значення опору за температури 0°С (R_0) і номінального значення відношення опорів $W_{100} = R_{100} / R_0$умовне позначення НСХ перетворення ТО має відповідати наведеному в табл. Д1.1.

Таблиця Д1.1

Умовні позначення НСХ ТО

Тип ТО	Номінальне значення R_0,. Ом	Умовне позначення перетворення НСХ		
		українське	міжнародне	
		W_{100}= 1,3850		W_{100} =1,3910
	1	1П	Pt1	Pt` 1
Платиновий	10	10П	Pt10	Pt`10
(ТОП)	50	50П	Pt 50	Pt`50
	100	100П	Pt 100	Pt`100
	500	500П	Pt 500	Pt`500
		W_{100}=1,4260		W_{100}= 1,4280
Мідний (ТОМ)	10	10М	Cu10	Cu'10
	50	50М	Cu50	Cu'50
	100	100М	Cu100	Cu'100
Нікелевий(ТОН)	100	100Н	N_i 100	

Відповідно до ДСТУ 2858-94. Термоперетворювачі опору. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. - Чинний від 23.11.1994.

1.2. Основні характеристики термоперетворювачів опору

Основні характеристики ТО мають відповідати вимогам, поданим у табл. Д1.2.

Таблиця Д1.2

Характеристики стандартних типів ТО

Назва характеристики	Тип ТО		
	Платинові (ТОП)	Мідні (ТОМ)	Нікелеві (ТОН)
Діапазон вимірюваних температур, °С	260...+850 (+1100 – для одиничного виробництва)	–200...+200	–60...+180
Клас допуску	Межа допустимого відхилення опору від НСХ для класів допуску, °С		
A	± (0,15 + 0,002 |*t*|) від – 220 до +850 °С	± (0,15 + 0,002 |*t*|) від –50 до +120 °С	
B	±(0,3 + 0,005 |*t*|) від – 220 до +1100 °С	±(0,25 + 0,0035 |*t*|) від –200 до +200 °С	
C	± (0,6 + 0,008 |*t*|) від – 100 до +300 °С, від 850 до 1100 °С	±(0,5 + 0,0065 |*t*|) від – 200 до +200 °С	±(0,3 + 0,0165 |*t*|) від –60 до 0 °С; ±(0,3+0,008 |*t*|) від 0 до 180 °С

Примітки. 1. *t* - значення вимірюваної температури, °С.

2. Допустимі відхилення опору від НСХ ТО для вимірювання температури нижче мінус 220°С і поверхневих ТО встановлено в технічних умовах на ТО конкретного типу.

3. Робочий діапазон ТО конкретного типу може включати частину діапазону вимірюваних температур, а також бути диференційованим за класом допуску ТО. Крім робочого діапазону, у технічних умовах на ТО конкретного типу може бути встановлено номінальне значення температури застосування.

4. Термоперетворювачі опору, що мають тільки два внутрішні з'єднувальні проводи і призначені для використання тільки з двома зовнішніми з'єднувальними проводами, не належать до класу допуску *A*.

Вимірювальний струм, який зумовлює зміну опору ТО за температури 0 °С не більше 0,1 % від його номінального значення, потрібно вибрати з ряду: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 10,0; 20,0; 50,0 мА і вказати в технічних умовах на ТО конкретного типу.

1.3. Допустиме відхилення опору термоперетворювачів опору

Допустиме відхилення опору ТО для 0 °С (R_0) від номінального значення має не перевищувати наведених у табл. Д1.3 значень.

Таблиця Д1.3

Допустиме відхилення опору від номінального значення за температури 0°С, %

Тип ТО	Клас допуску		
	A	*B*	*C*
Платиновий	0,05	0,1	0,2
Мідний	0,05	0,1	0,2
Нікелевий	–	–	0,24

1.4. Відношення опору термоперетворювачів опору для 100°С (R_{100}) до опору для 0°С (R_0)

Значення W_{100}, яке визначають як відношення опору ТО для 100°С (R_{100}) до опору для 0°С(R_0) має відповідати значенням, наведеним у табл. Д1.4.

Таблиця Д1.4

Значення W_{100}

Тип ТО	Клас допуску	Номінальне значення W_{100}	Найменше допустиме значення W_{100}
Платиновий	*A*	1,3850 1,3910	1,3845 1,3905
	B	1,3850 1,3910	1,3840 1,3900
	C	1,3850 1,3910	1,3835 1,3895
Мідний	*A*	1,4260 1,4280	1,4255 1,4275
	B	1,4260 1,4280	1,4250 1,4270
	C	1,4260 1,4280	1,4240 1,4260
Нікелевий	*C*	1,6170	1,6130

Примітка. Найбільше допустиме значення W_{100} не обмежується.

1.5. Номінальні статичні характеристики термоперетворювачів опору

Номінальні статичні характеристики перетворення ТО мають відповідати рівнянню

$$R_t = W_t R_0$$

де R_t,R_0 – опори ТО для температур t і 0 °С, Ом; W_t, – значення відношення опорів для температури t до опору для 0°С. Значення W_t, вибирають з табл. Д1.5 – Д1.9

Таблиця Д1.5

Платинові ТО з W_{100} = 1,3910.Залежність відношення опорів Wt, від температури

Температура, °С	Відношення опорів для температури, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-260	0,0040	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-250	0,0102	0,0092	0,0083	0,0075	0,0067	0,0061	0,0056	0,0051	0,0047	0,0043
-240	0,0270	0,0248	0,0227	0,0207	0,0189	0,0171	0,0155	0,0140	0,0126	0,0114
-230	0,0549	0,0517	0,0486	0,0455	0,0426	0,0397	0,0370	0,0343	0,0318	0,0294
-220	0,0906	0,0868	0,0830	0,0793	0,0756	0,0720	0,0684	0,0650	0,0615	0,0582
-210	0,1307	0,1266	0,1225	0,1184	0,1143	0,1103	0,1063	0,1023	0,0984	0,0945
-200	0,1730	0,1687	0,1645	0,1602	0,1559	0,1517	0,1475	0,1433	0,1391	0,1349

Продовження Таблиці Д1.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-190	0,2162	0,2118	0,2075	0,2031	0,1987	0,1944	0,1900	0,1856	0,1812	0,1768
-180	0,2596	0,2553	0,2509	0,2466	0,2423	0,2379	0,2336	0,2292	0,2249	0,2205
-170	0,3026	0,2983	0,2941	0,2898	0,2855	0,2812	0,2768	0,2725	0,2682	0,2639
-160	0,3454	0,3411	0,3369	0,3326	0,3283	0,3241	0,3198	0,3155	0,3112	0,3069
-150	0,3878	0,3836	0,3794	0,3751	0,3709	0,3667	0,3624	0,3582	0,3539	0,3496
-140	0,4300	0,4258	04216	0,4174	0,4132	0,4090	0,4048	0,4005	0,3963	0,3921
-130	0,4720	0,4678	0,4636	0,4594	0,4552	0,4510	0,4468	0,4426	0,4384	0,4342
-120	0,5137	0,5095	0,5053	0,5012	0,5386	0,5344	0,5303	0,5261	0,5220	0,5178
-110	0,5551	0,5510	0,5468	0,5427	0,7671	0,7628	0,7585	0,7541	0,7498	0,7454
-100	0,5964	0,5923	0,5881	0,5840	0,5799	0,5758	0,5716	0,5675	0,5634	0,5593
-90	0,6374	06333	0,6292	0,6251	0,6210	0,6169	0,6128	0,6087	0,6046	0,6005
-80	0,6783	0,6743	0,6702	0,6661	0,6620	0,6579	0,6538	0,6497	0,6456	0,6415
-70	0,7190	0,7150	0,7109	0,7068	0,7028	0,6987	0,6946	0,6906	0,6865	0,6824
-60	0,7596	0,7555	0,7515	0,7474	0,7434	0,7393	0,7353	0,7312	0,7227	0,7231
-50	0,8000	0,7960	0,7919	0,7879	0,7839	0,7798	0,7758	0,7717	0,7677	0,7636
-40	0,8403	0,8362	0,8322	0,8282	0,8242	0,8201	0,8161	0,8121	0,8081	0,8040
-30	0,8804	0,8764	0,8724	0,8684	0,8643	0,8603	0,8563	0,8523	0,8483	0,8443
-20	0,9204	0,9164	0,9124	0,9084	0,9044	0,9004	0,8964	0,8624	0,8884	0,8844
-10	0,9602	0,9563	0,9523	0,9483	0,9443	0,9403	0,9363	0,9324	0,9284	0,9244
0	1,0000	0,9960	0,9921	0,9881	0,9841	0,9801	0,9762	0,9722	0,9682	0,9642
0	1,0000	1,0040	1,0079	1,0119	1,0159	1,0198	1,0238	1,0278	1,0317	1,0357
10	1,0396	1,0436	1,0475	1,0515	1,0555	1,0594	1,0634	1,0673	1,0713	1,0752
20	1,0792	1,0831	1,0870	1,0910	1,0949	1,0989	1,1028	1,1067	1,1107	1,1146
30	1,1186	1,1225	1,1264	1,1303	1,1343	1,1382	1,1421	1,1461	1,1500	1,1539
40	1,1578	1,1618	1,1657	1,1696	1,1735	1,1774	1,1814	1,1853	1,1892	1,1931
50	1,1970	1,2009	1,2048	1,2087	1,2126	1,2165	1,2204	1,2244	1,2283	1,2322
60	1,2361	1,2400	1,2439	1,2447	1,2516	1,2555	1,2594	1,2633	1,2672	1,2711
70	1,2750	1,2789	1,2828	1,2866	1,2905	1,2944	1,2983	1,3022	1,3061	1,3099
80	1,3138	1,3177	1,3216	1,3254	1,3293	1,3332	1,3370	1,3409	1,3448	1,3486
90	1,3525	1,3564	1,3602	1,3641	1,3680	1,3718	1,3757	1,3795	1,3834	1,3872
100	1,3911	1,3949	1,3988	1,4026	1,4065	1,4103	1,4142	1,4180	1,4219	1,4257
110	1,4296	1,4334	1,4372	1,4411	1,4449	1,4488	1,4526	1,4564	1,4603	1,4641
120	1,4679	1,4717	1,4756	1,4794	1,4832	1,4870	1,4909	1,4947	1,4985	1,5023
130	1,5061	1,5100	1,5138	1,5176	1,5214	1,5252	1,5290	1,5328	1,5367	1,5405
140	1,5443	1,5481	1,5519	1,5557	1,5595	1,5633	1,5671	1,5709	1,5747	1,5785
150	1,5823	1,5861	1,5899	1,5939	1,5974	1,6012	1,6050	1,6088	1,6126	1,6164
160	1,6202	1,6239	1,6277	1,6315	1,6353	1,6391	1,6428	1,6466	1,6504	1,6542
170	1,6579	1,6617	1,6655	1,6692	1,6730	1,6768	1,6805	1,6843	1,6881	1,6918
180	1,6965	1,6993	1,7031	1,7068	1,7106	1,7144	1,7181	1,7219	1,7256	1,7294

Продовження Таблиці Д1.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
190	1,7331	1,7369	1,7406	1,7443	1,7481	1,7518	1,7556	1,7593	1,7631	1,7668
200	1,7705	1,7743	1,7780	1,7817	1,7855	1,7892	1,7929	1,7967	1,8004	1,8041
210	1,8078	1,8116	1,8153	1,8190	1,8227	1,8264	1,8302	1,8339	1,8376	1,8413
220	1,8450	1,8487	1,8524	1,8562	1,8599	1,8636	1,8673	1,8710	1,8747	1,8784
230	1,8821	1,8858	1,8895	1,8932	1,8969	1,9006	1,9043	1,9080	1,9117	1,9153
240	1,9190	1,9227	1,9264	1,9301	1,9338	1,9375	1,9412	1,9448	1,9485	1,9522
250	1,9559	1,9596	1,9632	1,9669	1„9706	1,9743	1,9779	1,9816	1,9853	1,9889
260	1,9926	1,9963	1,9999	2,0036	2,0073	2,0109	2,0146	2,0182	2,0219	2,0255
270	2,0292	2,0329	2,0365	2,0402	2,0438	2,0475	2,0511	2,0548	2,0584	2,0620
280	2,0656	2,0693	2,0730	2,0766	2,0802	2,0839	2,0875	2,0912	2,0948	2,1347
290	2,1021	2,1057	2,1093	2,1129	2,1166	2,1202	2,1238	2,1274	2,1311	2,1708
300	2,1383	2,1419	2,1455	2,1492	2,1528	2,1564	2,1600	2,1636	2,1672	2,2069
310	2,1744	2,1781	2,1817	2,1853	2,1889	2,1925	2,1961	2,1997	2,2033	2,2428
320	2,2105	2,2141	2,2177	2,2212	2,2248	2,2284	2,2320	2,2356	2,2392	2,2786
330	2,2464	2,2500	2,2535	2,2571	2,2607	2,2643	2,2679	2,2714	2,2750	2,3143
340	2,2822	2,2857	2,2893	2,2929	2,2964	2,3000	2,3036	2,3071	2,3107	2,3143
350	2,3178	2,3214	2,3249	2,3285	2,3321	2,3356	2,3392	2,3427	2,3463	2,3498
360	2,3534	2,3569	2,3605	2,3640	2,3676	2,3711	2,3747	2,3782	2,3817	2,3853
370	2,3888	2,3924	2,3959	2,3994	2,4030	2,4065	2,4100	2,4136	2,4171	2,4206
380	2,4241	2,4277	2,4312	2,4347	2,4382	2,4418	2,4453	2,4488	2,4523	2,4558
390	2,4593	2,4629	2,4664	2,4699	2,4734	2,4769	2,4804	2,4839	2,4874	2,4909
400	2,4944	2,4979	2,5014	2,5049	2,5084	2,5119	2,5154	2,5189	2,5224	2,5259
410	2,5294	2,5329	2,5364	2,5399	2,5434	2,5468	2,5503	2,5538	2,5573	2,5608
420	2,5643	2,5677	2,5712	2,5747	2,5782	2,5816	2,5851	2,5886	2,5921	2,5955
430	2,5990	2,6025	2,6059	2,6094	2,6129	2,6163	2,6198	2,6232	2,6267	2,6302
440	2,6336	2,6371	2,6405	2,6440	2,6474	2,6509	2,6543	2,6578	2,6612	2,6647
450	2,6681	2,6716	2,6750	2,6784	2,6819	2,6853	2,6888	2,6922	2,6956	2,6991
460	2,7025	2,7059	2,7094	2,7128	2,7162	2,7231	2,7231	2,7265	2,7299	2,7334
470	2,7368	2,7402	2,7436	2,7470	2,7505	2,7573	2,7573	2,7607	2,7641	2,7675
480	2,7709	2,7743	2,7777	2,7812	2,7846	2,7914	2,7914	2,7948	2,7982	2,8016
490	2,8050	2,8084	2,8118	2,8152	2,8186	2,8253	2,8253	2,8287	2,8321	2,8355
500	2,8389	2,8423	2,8457	2,8490	2,8524	2,8592	2,8592	2,8626	2,8659	2,8693
510	2,8727	2,8761	2,8794	2,8828	2,8862	2,8929	2,8929	2,8963	2,8997	2,9030
520	2,9064	2,9097	2,9131	2,9165	2,9198	2,9265	2,9265	2,9299	2,9332	2,9366
530	2,9400	2,9433	2,9467	2,9500	2,9534	2,9600	2,9600	2,9634	2,9667	2,9701
540	2,9734	2,9767	2,9801	2,9834	2,9868	2,9934	2,9934	2,9968	3,0001	3,0034
550	3,0067	3,0101	3,0134	3,0167	3,0201	3,0267	3,0267	3,0300	3,0333	3,0367
560	3,0400	3,0433	3,0466	3,0499	3,0532	3,0598	3,0598	3,0632	3,0665	3,0698
570	3,0731	3,0764	3,0797	3,0830	3,0863	3,0929	3,0929	3,0962	3,0995	3,1028

Продовження Таблиці Д1.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
580	3,1061	3,1094	3,1126	3,1159	3,1192	3,1258	3,1258	3,1291	3,1324	3,1357
590	3,1389	3,1422	3,1455	3,1488	3,1521	3,1586	3,1586	3,1619	3,1652	3,1684
600	3,1717	3,1738	3,1770	3,1803	3,1838	3,1901	3,1901	3,1933	3,1966	3,1998
610	3,2031	3,2064	3,2096	3,2129	3,2161	3,2226	3,2226	3,2258	3,2291	3,2323
620	3,2356	3,2388	3,2421	3,2453	3,2485	3,2550	3,2550	3,2582	3,2615	3,2647
630	3,2679	3,2712	3,2744	3,2776	3,2809	3,2873	3,2873	3,2905	3,2938	3,2970
640	3,3002	3,3034	3,3066	3,3098	3,3131	3,3195	3,3195	3,3227	3,3259	3,3291
650	3,3323	3,3355	3,3387	3,3419	3,3451	3,3515	3,3515	3,3547	3,3579	3,3611
660	3,3643	3,3675	3,3707	3,3739	3,3771	3,3835	3,3835	3,3867	3,3899	3,3930
670	3,3962	3,3994	3,4026	3,4058	3,4090	3,4153	3,4153	3,4185	3,4217	3,4248
680	3,4280	3,4312	3,4344	3,4375	3,4407	3,4470	3,4470	3,4502	3,4533	3,4565
690	3,4597	3,4628	3,4660	3,4691	3,4723	3,4786	3,4786	3,4818	3,4849	3,4881
700	3,4912	3,4944	3,4975	3,5007	3,5038	3,5101	3,5101	3,5132	3,5164	3,5195
710	3,5226	3,5258	3,5289	3,5320	3,5352	3,5414	3,5414	3,5446	3,5477	3,5508
720	3,5539	3,5571	3,5602	3,5633	3,5664	3,5696	3,5727	3,5758	3,5789	3,5820
730	3,5851	3,5883	3,5914	3,5945	3,5976	3,6007	3,6038	3,6069	3,6100	3,6131
740	3,6162	3,6193	3,6224	3,6255	3,6268	3,6317	3,6348	3,6379	3,6410	3,6441
750	3,6472	3,6503	3,6534	3,6564	3,6595	3,6626	3,6657	3,6688	3,6719	3,6749
760	3,6780	3,6811	3,6842	3,6872	3,6903	3,6934	3,6965	3,6995	3,7026	3,7057
770	3,7087	3,7118	3,7149	3,7179	3,7210	3,7241	3,7271	3,7302	3,7332	3,7363-
780	3,7393	3,7424	3,7455	3,7485	3,7516	3,7546	3,7577	3,7607	3,7637	3,7668
790	3,7698	3,7729	3,7759	3,7790	3,7820	3,7850	3,7881	3,7911	3,7941	3,7972
800	3,8002	3,8032	3,8063	3,8093	3,8123	3,8153	3,8184	3,8214	3,8244	3,8274
810	3,8305	3,8335	3,8365	3,8395	3,8425	3,8455	3,8486	3,8516	3,8546	3,8576
820	3,8606	3,8636	3,8666	3,8696	3,8726	3,8756	3,8786	3,8816	3,8846	3,8876
830	3,8906	3,8936	3,8966	3,8996	3,9026	3.9056	3,9086	3,9116	3,9145	3,9175
840	3,9205	3,9235	3,9265	3,9295	3,9324	3,9354	3,9384	3,9414	3,9444	3,9473
850	3,9503	3,9533	3,9859	3,9592	3,9622	3,9652	3,9681	3,9711	3,9740	3,9770
860	3,9800	3,9829	3,9829	3,9888	3,9918	3,9948	3,9977	4,0007	4,0036	4,0066
870	40095	4,0125	4,0154	4,0184	4,0213	4,0243	4,0272	4,0301	4,0331	4,0360
880	4,0390	4,0419	4,0448	4,0478	4,0507	4,0536	4,0566	4,0595	4,0624	4,0653
890	4,0683	4,0712	4,0741	4,0770	4,0800	4,0829	4,0858	4,1178	4,0916	4,0946
900	4,0975	4,1004	4,1033	4,1062	4,1091	4,1120	4,1149	4,1468	4,1207	4,1236
910	4,1266	4,1295	4,1324	4,1353	4,1382	4,1410	4,1439	4,1757	4,1497	4,1526
920	4,1555	4,1584	4,1613	4,1642	4,1671	4,1700	4,1728	4,2045	4,1786	4,1815
930	4,1844	4,1872	4,1901	4,1930	4,1959	4,1987	4,2016	4,2331	4,2074	4,2102
940	4,2131	4,2160	4,2188	4,2217	4,2246	4,2274	4,2303	4,2617	4,2360	4,2389
950	4,2417	4,2446	4,2474	4,2503	4,2531	4,2560	4,2588	4,2901	4,2645	4,2679
960	4,2702	4,2730	4,2759	4,2787	4,2816	4,2844	4,2872	4,3184	4,2929	4,2957

Продовження Таблиці Д1.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
970	4,2986	4,3014	4,3042	4,3071	4,3099	4,3127	4,3156	4,3184	4,3212	4,3240
980	4,33268	4,3297	4,3325	4,3353	4,3381	4,3409	4,3437	4,3466	4,3494	4,3522
990	4,3550	4,3578	4,3606	4,3634	4,3662	4,3690	4,3718	4,3746	4,3774	4,3802
1000	4,3830	4,3858	4,3886	4,3914	4,3942	4,3970	4,3998	4,4026	4,4053	4,4081
1010	4,4109	4,4137	4,4165	4,4193	4,4221	4,4248	4,4276	4,4304	4,4332	4,4359
1020	4,4387	4,4415	4,4443	4,4470	4,4498	4,4526	4,4553	4,4581	4,4609	4,4636
1030	4,4664	4,4691	4,4719	4,4747	4,4774	4,4802	4,4829	4,4857	4,4884	4,4912
1040	4,4939	4,4967	4,4994	4,5022	4,5049	4,5077	4,5104	4,5132	4,5159	4,5186
1050	4,5214	4,5241	4,5269	4,5296	4,5323	4,5351	4,5378	4,5405	4,5433	4,5460
1060	4,5487	4,5514	4,5542	4,5569	4,5596	4,5623	4,5650	4,5678	4,5705	4,5732
1070	4,5759	4,5786	4,5813	4,5841	4,5868	4,5895	4,5922	4,5949	4,5976	4,6003
1080	4,6030	4,6057	4,6084	4,6111	4,6138	4,6165	4,6192	4,6219	4,6264	4,6273
1090	4,6300	4,6327	4,6354	4,6380	4,6407	4,6434	4,6461	4,6488	4,6515	4,6541
1100	4,6568	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблиця Д1.6.

Платинові ТО з W_{100}= 1,3850.Залежність відношення опорів W_tвід температури

Температура, °С	Відношення опорів для температури, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-200	0,1852	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-190	0,2283	0,2240	0,2197	0,2154	0,2111	0,2068	0,2025	0,1982	0,1938	0,1895
-180	0,2710	0,2667	0,2624	0,2582	0,2539	0,2497	0,2454	0,2411	0,2368	0,2325
-170	0,3134	0,3091	0,3049	0,3007	0,2964	0,2922	0,2880	0,2837	0,2795	0,2752
-160	0,3554	0,3512	0,3470	0,3428	0,3386	0,3344	0,3302	0,3260	0,3218	0,3176
-150	0,3972	0,3931	0,3889	0,3847	0,3805	0,3764	0,3722	0,3680	0,3638	0,3596
-140	0,4388	0,4346	0,4305	0,4263	0,4222	0,4180	0,4139	0,4097	0,4056	0,4014
-130	0,4800	0,4759	0,4718	0,4677	0,4636	0,4594	0,4553	0.4512	0,4470	0,4429
-120	0,5211	0,5170	0,5129	0,5088	0,5047	0,5006	0,4965	0,4924	0,4883	0,4842
-110	0,5619	0,5579	0,5538	0,5497	0,5456	0,5415	0,5375	0,5334	0,5293	0,5252
-100	0,6026	0,5985	0,5944	0,5904	0,5863	0,5823	0,5782	0,5741	0,5701	0,5660
-90	0,6430	0,6390	0,6349	0,6309	0,6268	0,6228	0,6188	0,6147	0,6107	0,6066
-80	0,6833	0,6792	0,6752	0,6712	0,6672	0,6631	0,6591	0,6551	0,6511	0,6470
-70	0,7233	0,7193	0,7153	0,7113	0,7073	0,7033	0,6993	0,6953	0,6913	0,6873
-60	0,7633	0,7593	0,7553	0,7513	0,7473	0,7433	0,7393	0,7353	0,7313	0,7273
-50	0,8031	0,7991	0,7951	0,7911	0,7872	0,7872	0,7792	0,7752	0,7712	0,7673
-40	0,8427	0,8387	0,8348	0,8308	0,8267	0,8269	0,8189	0,8150	0,8110	0,8070
-30	0,8822	0,8783	0,8743	0,8704	0,8664	0,8664	0,8585	0,8546	0,8506	0,8467
-20	0,9216	0,9177	0,9137	0,9098	0,9059	0,9059	0,8980	0,8940	0,8901	0,8862
-10	0,9609	0,9569	0,9530	0,9491	0,9452	0,9452	0,9373	0,9334	0,9295	0,9255
0	1,0000	0,9961	0,9922	0,9883	0,9844	0,9844	0,9765	0,9726	0,9687	0,9648

Продовження Таблиці Д1.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	1,0000	1,0039	1,0078	1,0117	1,0156	1,0195	1,0234	1,0273	1,0312	1,0351
10	1,0390	1,0429	1,0468	1,0507	1,0546	1,0585	1,0624	1,0663	1,0702	1,0740
20	1,0779	1,0818	1,0857	1,0896	1,0935	1,0973	1,1012	1,1051	1,1090	1,1129
30	1,1167	1,1206	1,1245	1,1283	1,1322	1,1361	1,1400	1,1438	1,1477	1,1515
40	1,1554	1,1593	1,1631	1,1670	1,1708	1,1747	1,1786	1,1824	1,1863	1,1901
50	1,1940	1,1978	1,2017	1,2055	1,2094	1,2132	1,2171	1,2209	1,2247	1,2286
60	1,2324	1,2363	1,2401	1,2439	1,2478	1,2516	1,2554	1,2593	1,2631	1,2669
70	1,2708	1,2746	1,2784	1,2822	1,2861	1,2899	1,2973	1,2975	1,3013	1,3052
80	1,3090	1,3128	1,3166	1,3204	1,3242	1,3280	1,3318	1,3357	1,3395	1,3433
90	1,3471	1,3509	1,3547	1,3585	1,3623	1,3661	1,3699	1,3737	1,3775	1,3813
100	1,3851	1,3888	1,3926	1,3964	1,4002	1,4040	1,4078	1,4116	1,4154	1,4191
110	1,4229	1,4267	1,4305	1,4343	1,4380	1,4418	1,4456	1,4494	1,4531	1,4569
120	1,4607	1,4644	1,4682	1,4720	1,4757	1,4795	1,4833	1,4870	1,4908	1,4946
130	1,4983	1,5021	1,5058	1,5096	1,5133	1,5171	1,5208	1,5246	1,5283	1,5321
140	1,5358	1,5396	1,5433	1,5471	1,5508	1,5546	1,5583	1,5620	1,5658	1,5695
150	1,5733	1,5770	1,5807	1,5845	1,5882	1,5919	1,5956	1,5994	1,6031	1,6068
160	1,6105	1,6143	1,6180	1,6217	1,6254	1,6291	1,6329	1,6366	1,6403	1,6440
170	1,6477	1,6514	1,6551	1,6589	1,6626	1,6663	1,6700	1,6737	1,6774	1,6811
180	1,6848	1,6885	1,6922	1,6959	1,6996	1,7033	1,7070	1,7107	1,7143	1,7180
190	1,7217	1,7254	1,7291	1,7328	1,7365	1,7402	1,7438	1,7475	1,7512	1,7549
200	1,7586	1,7622	1,7659	1,7696	1,7733	1,7769	1,7806	1,7843	1,7879	1,7916
210	1,7953	1,7989	1,8026	1,8063	1,8099	1,8136	1,8172	1,8209	1,8246	1,8282
220	1,8319	1,8355	1,8392	1,8428	1,8465	1,8501	1,8538	1,8574	1,8611	1,8647
230	1,8684	1,8720	1,8756	1,8793	1,8829	1,8866	1,8902	1,8938	1,8975	1,9011
240	1,9047	1,9084	1,9120	1,9156	1,9192	1,9229	1,9265	1,9301	1,9337	1,9374
250	1,9410	1,9446	1,9482	1,9518	1,9555	1,9591	1,9627	1,9663	1,9699	1,9735
260	1,9771	1,9807	1,9843	1,9879	1,9915	1,9951	1,9987	2,0023	2,0059	2,0095
270	2,0131	2,0167	2,0203	2,0239	2,0275	2,0311	2,0347	2,0383	2,0419	2,0455
280	2,0490	2,0526	2,0562	2,0598	2,0634	2,0670	2,0705	2,0741	2,0777	2,0813
290	2,0848	2,0884	2,0920	2,0956	2,0991	2,1027	2,1063	2,1098	2,1134	2,1170
300	2,1205	2,1241	2,1276	2,1312	2,1348	2,1383	2,1419	2,1454	2,1490	2,1525
310	2,1561	2,1596	2,1632	2,1667	2,1703	2,1738	2,1774	2,1809	2,1844	2,1880
320	2,1915	2,1951	2,1986	2,2021	2,2057	2,2092	2,2127	2,2163	2,2198	2,2233
330	2,2268	2,2304	2,2339	2,2374	2,2409	2,2445	2,2480	2,2515	2,2550	2,2585
340	2,2621	2,2656	2,2691	2,2726	2,2761	2,2796	2,2831	2,2866	2,9202	2,2937
350	2,2972	2,3007	2,3042	2,3077	2,3112	2,3147	2,3182	2,3217	2,3252	2,3287
360	2,3321	2,3356	2,3391	2,3426	2,3461	2,3496	2,3531	2,3566	2,3600	2,3635
370	2,3670	2,3705	2,3740	2,3774	2,3809	2,3844	2,3879	2,3913	2,3948	2,3983
380	2,4018	2,4052	2,4087	2,4122	2,4156	2,4191	2,4226	2,4260	2,4295	2,4329
390	2,4364	2,4399	2,4443	2,4468	2,4502	2,4537	2,4571	2,4606	2,4640	2,4675
400	2,4709	2,4744	2,4778	2,4813	2,4847	2,4881	2,4916	2,4950	2,4985	2,5019
410	2,5053	2,5088	2,5122	2,5156	2,5191	2,5225	2,5259	2,5293	2,5328	2,5362
420	2,5396	2,5430	2,5464	2,5499	2,5533	2,5567	2,5601	2,5635	2,5670	2,5704

Продовження Таблиці Д1.6

430	2,5738	5.5772	2,5806	2,5840	2,5874	2,5908	2,5942	2,5976	2,6010	2,6044
440	2,6078	2,6112	2,6146	2,6180	2,6214	2,6248	2,6282	2,6316	2,6350	2,6384
450	2,6418	2,6452	2,6486	2,6520	2,6553	2,6587	2,6621	2,6655	2,6689	2,6722
460	2,6756	2,6790	2,6824	2,6857	2,6891	2,6925	2,6959	2,6992	2,7026	2,7060
470	2,7093	2,7127	2,7161	2,7194	2,7228	2,7261	2,7295	2,7329	2,7362	2,7396
480	2,7429	2,7463	2,7496	2,7530	2,7563	2,7597	2,7630	2,7664	2,7697	2,7731
490	2,7764	2,7798	2,7831	2,7864	2,7898	2,7931	2,7964	2,7998	2,8031	2,8064
500	2,8098	2,8131	2,8164	2,8198	2,8231	2,8264	2,8297	2,8331	2,8364	2,8397
510	2,8430	2,8463	2,8497	2,8530	2,8563	2,8596	2,8629	2,8662	2,8695	2,8729
520	2,8762	2,8795	2,8828	2,8861	2,8894	2,8927	2,8960	2,8993	2,9026	2,9059
530	2,9092	2,9125	2,9158	2,9191	2,9224	2,9256	2,9289	2,9322	2,9335	2,9388
540	2,9421	2,9454	2,9486	2,9519	2,9552	2,9585	2,9618	2,9650	2,9683	2,9716
550	2,9749	2,9781	2,9814	2,9847	2,9880	2,9912	2,9945	2,9978	3,0010	3,0043
560	3,0075	3,0108	3,0141	3,0173	3,0206	3,0238	3,0271	3,0303	3,0336	3,0369
570	3,0401	3,0434	3,0466	3,0498	3,0531	3,0563	3,0596	3,0628	3,0661	3,0693
580	3,0725	3,0758	3,0790	3,0823	3,0855	3,0887	3,0920	3,0952	3,0984	3,1016
590	3,1049	3,1081	3,1113	3,1145	3,1178	3,1210	3,1242	3,1274	3,1306	3,1339
600	3,1371	3,1403	3,1435	3,1467	3,1499	3,1531	3,1564	3,1596	3,1628	3,1660
610	3,1692	3,1724	3,1756	3,1788	3,1820	3,1852	3,1884	3,1916	3,1948	3,1980
620	3,2012	3,2043	3,2075	3,2107	3,2139	3,2171	3,2203	3,2235	3,2267	3,2298
630	3,2330	3,2362	3,2394	3,2426	3,2457	3,2489	3,2521	3,2553	3,2584	3,2616
640	3,2648	3,2679	3,2711	3,2743	3,2774	3,2806	3,2838	3,2869	3,2901	3,2932
650	3,2964	3,2996	3,3027	3,3059	3,3090	3,3122	3,3153	3,3185	3,3216	3,3248
660	3,3279	3,3311	3,3342	3,3374	3,3405	3,3436	3,3468	3,3499	3,3531	3,3562
670	3,3593	3,3625	3,3656	3,3687	3,3718	3,3750	3,3781	3,3812	3,3844	3,3875
680	3,3906	3,3937	3,3969	3,4000	3,4031	3,4062	3,4093	3,4124	3,4156	3,4187
690	3,4218	3,4249	3,4280	3,4311	3,4342	3,4373	3,4404	3,4435	3,4466	3,4497
700	3,4528	3,4559	3,4590	3,4621	3,4652	3,4683	3,4714	3,4745	3,4776	3,4807
710	3,4838	3,4869	3,4899	3,4930	3,4961	3,4992	3,5023	3,5054	3,5084	3,5115
720	3,5146	3,5177	3,5208	3,5238	3,5269	3,5300	3,5330	3,5361	3,5392	3,5422
730	3,5453	3,5484	3,5514	3,5545	3,5576	3,5606	3,5636	3,5667	3,5698	3,5728
740	3,5759	3,5790	3,5820	3,5851	3,5881	3,5912	3,5942	3,5972	3,6003	3,6033
750	3,6064	3,6094	3,6125	3,6155	3,6185	3,6216	3,6246	3,6276	3,6307	3,6337
760	3,6367	3,6398	3,6428	3,6458	3,6489	3,6519	3,6549	3,6579	3,6610	3,6640
770	3,6670	3,6700	3,6730	3,6760	3,6791	3,6821	3,6851	3,6881	3,6911	3,6941
780	3,6971	3,7001	3,7031	3,7061	3,7091	3,7121	3,7151	3,7181	3,7211	3,7241
790	3,7271	3,7301	3,7331	3,7361	3,7391	3,7421	3,7451	3,7481	3,7511	3,7541
800	3,7570	3,7600	3,7630	3,7660	3,7690	3,7719	3,7749	3,7779	3,7809	3,7839
810	3,7868	3,7898	3,7928	3,7957	3,7987	3,8017	3,8046	3,8076	3,8106	3,8135
820	3,8165	3,8195	3,8224	3,8254	3,8283	3,8313	3,8342	3,8372	3,8401	3,8431
830	3,8460	3,8490	3,8519	3,8549	3,8578	3,8608	3,8637	3,8667	3,8696	3,8725
840	3,8755	3,8784	3,8814	3,8843	3,8872	3,8902	3,8931	3,8960	3,8990	3,9019
850	3,9048	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблиця Д1.7.

Мідні ТО з W_{100}= 1,4280.Залежність відношення опорів W_t від температури

Температура, °С			Відношення опорів для температури,					°С		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	0,1217	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-190	0,1628	0,1586	0,1545	0,1504	0,1463	0,1422	0,1381	0,1340	0,1299	0,1258
-180	0,2058	0,2012	0,1966	0,1921	0,1875	0,1833	0,1792	0,1751	0,1710	0,1669
-170	0,2514	0,2469	0,2423	0,2378	0,2332	0,2286	0,2241	0,2195	0,2149	0,2104
-160	0,2968	0,2923	0,2878	0,2832	0,2787	0,2742	0,2696	0,2651	0,2605	0,2560
-150	0,3421	0,3375	0,3330	0,3285	0,3240	0,3195	0,3150	0,3104	0,3059	0,3014
-140	0,3871	0,3826	0,3781	0,3736	0,3691	0,3646	0,3601	0,3556	0,3511	0,3466
-130	0,4319	0,4274	0,4230	0,4185	0,4140	0,4095	0,4050	0,4005	0,3961	0,3916
-120	0,4766	0,4721	0,4676	0,4632	0,4587	0,4543	0,4498	0,4453	0,4409	0,4364
-110	0,5210	0,5166	0,5121	0,5077	0,5033	0,4988	0,4944	0,4899	0,4855	0,4810
-100	0,5653	0,5609	0,5565	0,5520	0,5476	0,5432	0,5388	0,5343	0,5299	0,5255
-90	0,6101	0,6058	0,6014	0,5970	0,5926	0,5882	0,5838	0,5795	0,5751	0,5707
-80	0,6539	0,6495	0,6452	0,6408	0,6364	0,6320	0,6277	0,6233	0,6189	0,6145
-70	0,6975	0,6932	0,6888	0,6845	0,6801	0,6757	0,6714	0,6670	0,6626	0,6583
-60	0,7411	0,7367	0,7324	0,7280	0,7237	0,7193	0,7150	0,7106	0,7063	0,7019
-50	0,7845	0,7802	0,7758	0,7715	0,7671	0,7628	0,7585	0,7541	0,7498	0,7454
-40	0,8278	0,8235	0,8192	0,8148	0,8105	0,8062	0,8018	0,7975	0,7932	0,7888
-30	0,8710	0,8667	0,8624	0,8581	0,8538	0,8494	0,8451	0,8408	0,8365	0,8321
-20	0,9141	0,9098	0,9055	0,9012	0,8969	0,8926	0,8883	0,8840	0,8797	0,8753
-10	0,9571	0,9528	0,9485	0,9442	0,9399	0,9356	0,9313	0,9270	0,9227	0,9184
0	1,0000	0,9957	0,9914	0,9872	0,9829	0,9786	0,9743	0,9701	0,9658	0,9615
0	1,0000	1,0043	1,0086	1,0128	1,0171	1,0214	1,0257	1,0299	1,0342	1,0385
10	1,0428	1,0471	1,0513	1,0556	1,0599	1,0642	1,0684	1,0727	1,0770	1,0813
20	1,0856	1,0898	1,0941	1,0984	1,1027	1,1069	1,1112	1,1155	1,1198	1,1240
30	1,1283	1,1326	1,1369	1,1412	1,1454	1,1497	1,1540	1,1583	1,1625	1,1668
40	1,1711	1,1754	1,1797	1,1839	1,1882	1,1925	1,1968	1,2010	1,2053	1,2096
50	1,2139	1,2182	1,2224	1,2267	1,2310	1,2353	1,2395	1,2438	1,2481	1,2524
60	1,2567	1,2609	1,2652	1,2695	1,2738	1,2780	1,2823	1,2866	1,2909	1,2952
70	1,2994	1,3037	1,3080	1,3123	1,3165	1,3208	1,3251	1,3294	1,3336	1,3379
80	1,3422	1,3465	1,3550	1,3550	1,3593	1,3636	1,3679	1,3721	1,3764	1,3807
90	1,3850	1,3893	1,3935	1,3978	1,4021	1,4064	1,4106	1,4149	1,4192	1,4235
100	1,4278	1,4320	1,4363	1.4406	1,4449	1,4491	1,4534	1,4577	1,4620	1,4663
110	1,4705	1,4748	1,4791	1,4834	1,4876	1,4919	1,4962	1,5005	1,5048	1,5090
120	1,5133	1,5176	1,5219	1,5261	1,5304	1,5347	1,5390	1,5432	1,5475	1,5518
130	1,5561	1,5604	1,5646	1,5689	1,5732	1,5775	1,5817	1,5860	1,5903	1,5946
140	1,5989	1,6031	1,6074	1,6117	1,6160	1,6202	1,6245	1,6288	1,6331	1,6374
150	1,6416	1,6459	1,6502	1,6545	1,6587	1,6630	1,6673	1,6716	1,6759	1,6801
160	1,6844	1,6887	1,6930	1,6972	1,7015	1,7058	1,7101	1,7144	1,7186	1,7229
170	1,7272	1.7315	1,7357	1,7400	1,7443	1,7486	1,7528	1,7571	1,7614	1,7657
180	1,7700	1,7742	1,7785	1,7828	1,7871	1,7913	1,7956	1,7999	1,8042	1,8085
190	1,8127	1,8170	1,8213	1,8256	1,8298	1,8341	1,8384	1,8427	1,8470	1,8512
200	1,8555	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблиця Д1.8.

Мідні ТО з W_{100} = 1,4260.Залежність відношення опорівW_t від температури

Темпе-ратура, °С			Відношення опорів для температури,					°С		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	0,7869	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-40	0,8295	0,8253	0,8210	0,8168	0,8125	0,8082	0,8040	0,7997	0,7954	0,7912
-30	0,8722	0,8679	0,8636	0,8594	0,8551	0,8508	0,8466	0,8423	0,8381	0,8338
-20	0,9148	0,9105	0,9062	0,9020	0,8977	0,8935	0,8892	0,8849	0,8807	0,8764
-10	0,9574	0,9531	0,9489	0,9446	0,9403	0,9361	0,9318	0,9276	0,9233	0,9190
0	1,0000	0,9957	0,9915	0,9872	0,9830	0,9787	0,9744	0,9702	0,9659	0,9616
0	1,0000	1,0043	1,0085	1,0128	1,0170	1,0213	1,0256	1,0298	1,0341	1,0384
10	1,0426	1,0469	1,0511	1,0554	1,0597	1,0639	1,0682	1,0724	1,0767	1,0810
20	1,0852	1,0895	1,0938	1,0980	1,1023	1,1065	1,1108	1,1151	1,1193	1,1236
30	1,1278	1,1321	1,1364	1,1406	1,1449	1,1492	1,1534	1,1577	1,1619	1,1662
40	1,1705	1,1747	1,1790	1,1832	1,1875	1,1918	1,1960	1,2003	1,2046	1,2088
50	1,2131	1,2173	1,2216	1,2259	1,2301	1,2344	1,2386	1,2429	1,2472	1,2514
60	1,2557	1,2600	1,2642	1,2685	1,2727	1,2770	1,2813	1,2855	1,2898	1,2940
70	1,2983	1,3026	1,3068	1,3111	1,3154	1,3196	1,3239	1.3281	1,3324	1,3367
80	1,3409	1,3452	1,3494	1,3537	1,3580	1,3622	1,3665	1,3708	1,3750	1,3793
90	1,3835	1,3878	1,3921	1,3963	1,4006	1,4048	1,4091	1,4134	1,4176	1,4219
100	1,4262	1,4304	1,4347	1,4389	1,4432	1,4475	1,4517	1,4560	1,4602	1,4645
110	1,4688	1,4730	1,4773	1,4816	1,4858	1,4901	1,4943	1,4986	1,5029	1,5071
120	1,5114	1,5156	1,5199	1,5242	1,5284	1,5327	1,5370	1,5412	1,5455	1,5497
130	1,5540	1,5583	1,5625	1,5668	1,5710	1,5710	1,5796	1,5838	1,5881	1,5924
140	1,5966	1,6009	1,6051	1,6094	1,6137	1,6179	1,6222	1,6265	1,6307	1,6350
150	1,6392	1,6435	1,6478	1,6520	1,6563	1,6605	1,6648	1,6691	1,6733	1,6776
160	1,6819	1,6861	1,6904	1,6946	1,6989	1,7032	1,7074	1,7117	1,7159	1,7202
170	1,7245	1,7287	1,7330	1,7373	1,7415	1,7458	1,7500	1,7543	1,7586	1,7628
180	1,7671	1,7713	1,7756	1,7799	1,7841	1,7884	1,7927	1,7969	1,8012	1,8054
190	1,8097	1,8140	1,8182	1,8225	1,8267	1,8310	1,8353	1,8395	1,8438	1,8481
200	1,8523	-	-	-	-	-	_	-	-	-

Таблиця Д1.9.

Нікелеві ТО з W_{100}= 1,6170.Залежність відношення опорів W_t від температури

Темпе ратура, °С			Відношення опорів для температури,					°С		
	0	1	2	3	4	5	6	. 7	8	9
-60	0,6945	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-50	0,7421	0,7373	0,7325	0,7277	0,7229	0,7181	0,7134	0,7087	0,7039	0,6992
-40	0,7910	0,7860	0,7811	0,7761	0,7712	0,7663	0,7615	0,7566	0,7517	0,7469
-30	0,8412	0,8361	0,8310	0,8260	0,8209	0,8159	0,8109	0,8059	0,8009	0,7959
-20	0,8928	0,8876	0,8824	0,8772	0,8720	0,8668	0,8617	0,8565	0,8514	0,8463
-10	0,9457	0,9404	0,9350	0,9297	0,9244	0,9191	0,9138	0,9085	0,9033	0,8980
0	1,0000	0,9945	0,9890	0,9836	0,9781	0,9727	0,9673	0,9619	0,9565	0,9511
0	1,0000	1,0055	1,0110	1,0165	1,0221	1,0277	1,0332	1,0388	1,0444	1,0500
10	1,0426	1,0613	1,0669	1,0726	1,0783	1,0840	1,0897	1,0954	1,1011	1,1069
20	1,0852	1,1184	1,1242	1,1300	1,1358	1,1416	1,1475	1,1533	1,1592	1,1651

Продовження Таблиці Д1.9

30	1,1278	1,1769	1,1828	1,1887	1,1947	1,2006	1,2066	1,2126	1,2186	1,2246
40	1,1705	1,2367	1,2428	1,2488	1,2549	1,2610	1,2671	1,2733	1,2794	1,2855
50	1,2131	1,2979	1,3041	1,3103	1,3165	1,3227	1,3290	1,3352	1,3415	1,3478
60	1,2557	1,3604	1,3667	1,3731	1,3794	1,3858	1,3922	1,3986	1,4050	1,4114
70	1,2983	1,4243	1,4308	1,4372	1,4437	1,4502	1,4567	1,4633	1,4698	1,4764
80	1,3409	1,4895	1,4961	1,5027	1,5094	1,5160	1,5226	1,5293	1,5360	1,5427
90	1,3835	1,5561	1,5628	1,5696	1,5763	1,5831	1,5899	1,5967	1,6035	1,6103
100	1,4262	1,6241	1,6311	1,6381	1,6451	1,6521	1,6591	1,6662	1,6733	1,6803
110	1,4688	1,6946	1,7017	1,7089	1,7161	1,7232	1,7305	1,7377	1,7449	1,7522
120	1,5114	1,7668	1,7741	1,7815	1,7888	1,7962	1,8036	1,8110	1,8184	1,8259
130	1,5540	1,8408	1,8484	1,8559	1,8634	1,8710	1,8786	1,8862	1,8938	1,9014
140	1,5966	1,9168	1,9245	1,9322	1,9400	1,9477	1,9555	1,9633	1,9711	1,9789
150	1,6392	1,9947	2,0026	2,0105	2,0184	2,0264	2,0344	2,0424	2,0504	2,0584
160	2,6819	2,0746	2,0827	2,0908	2,0908	2,1071	2,1153	2,1235	2,1317	2,1400
170	2,7245	2,1565	2,1648	2,1732	2,1815	2,1899	2,1983	2,2067	2,2151	2,2236
180	2,7671	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1.6. Інтерполяційні залежності W_t *(t)* для термоперетворювачів опору

Для платинового ТО з W_{100} = 1,3910:

$W_t = 1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3$ - для діапазону температур – 200...0°С;

$W_t = 1 + At + Bt^2$ – для діапазону температур 0...600°С,

де A=3,9692·10^{-3}°С$^{-1}$; B = –5,8290·10^{-7} °С$^{-2}$; C = –4,3303·10^{-12}°С$^{-4}$;

$W_t = 1 + At + Bt^2$ - для діапазону температур +600...+1100°С,

де B = –5,8621·10^{-7}°С$^{-2}$.

Для платинового ТО з W_{100}= 1,3850:

$W_t = 1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3$ – для діапазону температур –200...0°С;

$W_t = 1 + At + Bt^2$ – для діапазону температур 0...+850 °С,

де A =3,9083·10^{-3}°С$^{-1}$;B =–5,7750·10^{-7} °С$^{-2}$; С = –4,1830·10^{-12}°С$^{-4}$**.**

Для мідного ТО з W_{100}= 1,4280:

$W_t = 1 + A(t-13,7)$ – для діапазону температур –200... – 185°С;

$W_t = 1 + at + Bt(t-10) + Ct^3$ – для діапазону температур –185... –100°С;

$W_t = 1 + at + Bt(t-10)$ – для діапазону температур –100 ... –10 °С;

$W_t = 1 + \alpha t$ – для діапазону температур –10...+200 °С,

де α = 4,28·10^{-3} °С$^{-1}$; A = 4,2775·10^{-3} °С$^{-1}$; B = –5,4136·10^{-7} °С$^{-2}$;

C = 9,8265·10^{-10}°С$^{-3}$.

Для **мідного ТО *з*W_{100} = 1,4260:**

$W_t = 1 + \alpha t$ – для діапазону температур – 50...+200 °С,

де α = 4,26·10^{-3} °С$^{-1}$.

Для нікелевого ТО з W_{100} = 1,6170:

$W_t = 1 + At + Bt^2$ - для діапазону температур – 60...+100°С;

$W_t = 1 + At + Bt^2 + C(t-100)\,t^3$ – для діапазону температур 100... 180 °С, де

A = 5,4963·10^{-3} °C^{-1}; B = 6,7556·10^{-6} °C^{-2}; C = 9,2004·10^{-9} °C^{-3}.

1.7. Визначення чутливості термоперетворювачів опору

Платинові ТО:

$dR_t/dt = R_0[A + 2Bt + 4Ct^2(t - 75)]$ – для діапазону температур –200...0°С;

$dR_t/dt = R_0(A + 2Bt)$ – Для діапазону температур 0...1100°С.

Мідні ТО з W_{100} = 1,4280:

$dR_t/dt = AR_0$ - для діапазону температур – 200.. . – 185°С;

$dR_t/dt = (\alpha + 2Bt - 10B + 3Ct^2) R_0$ – для діапазону температур – 185... – 100°С; $dR_t/dt = (\alpha + 2Bt – 10B)R_0$ – для діапазону температур – 100... – 10°С;

$dR_t/dt = \alpha R_0$ – для діапазону температур – 10.. .+200 °С.

Мідні ТО *з* W_{100}=1,4260:

$dR_t/dt = \alpha R_0$

Значення коефіцієнтів *A, B, C,* а встановлюють відповідно до п. 1.6 цього додатка.

Значення ΔR_t можна визначити також за рівнянням

$$\Delta R_t = \Delta t(\Delta R/\Delta t_1),$$

де ΔR – приріст опору в околі температурної точки t; Δt_1 – розмах околу.

Нікелеві ТО:

$dR_t/dt = R_0 (A + 2Bt)$ – для діапазону температур – 60...+100°С;

$dR_t/dt = R_0 [A + Bt + Ct (3t – 200)]$ – для діапазону температур +100...+180°С.

ДОДАТОК 2

ТИПИ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

2.1. Типи термоелектричних перетворювачів

Типи ТП, літерні позначення номінальних статичних характеристик ТП, орієнтовний хімічний склад матеріалів термоелектродів і діапазони вимірюваних температур мають відповідати наведеним у табл. Д2.1.

Таблиця Д2.1.

Типи термоелектричних перетворювачів, їх основні характеристики

Тип ТП	Літерне позначення НСХ		Матеріал термоелектродів		Діапазон вимірюваних температур за довгочасного використання, °С	Гранична температура за короткочасного використання, °С
	До 01.01. 1995 р.	З 01.01. 1995 р.	позитивного	негативного		
1	2	3	4	5	6	7
ТПП 13 Платинородій-платинові (платина 13%родій/платина)	ПП(R)	R	Сплав платинородій ПР-13 (87%Pt +13 % Rh)	Платина (Pt)	0...1300	+1600
ТПП 10 Платинородій-платинові (платина - 10% ро - дій/платина)	ПП(S)	S	Сплав платинородій ПР-10 (90%Pt + + 10%Rh)		0...1300	+1600
ТПР Платинородій-платинородієві (платина – 30% родій/платина - 6%родій)	ПР(В)	*B*	Сплав платинородій ПР-30 (70% Pt + + 30%Rh)	Сплав платинородій ПР-6 (94%Pt + 6% Rh)	+600...+1600	+1700
ТЗК Залізо-константанові (залізо/мідь - нікель)	ЗК(J)	*J*	Залізо (Fe)	Сплав константан (55%Cu + +45%Ni, Mn,Fe)	-200...+750	+900
ТМКн Мідь-константанові (мідь/мідь - нікель)	МК(Т)	*T*	Мідь М1(Cu)	Сплав константан (55%Cu + +45%Ni, Mn,Fe)	-200...+350	+400
ТНН Ніхросил-нісилові (нікель - хром - кремній/нікель - кремній)	НН(N)	*N*	Сплав ніхросил[(83,49 - 84,89) %Ni + (13,7-14,7)% Cr + (1,2- 1,6) % Si + 0,15 % Fe + 0,05 % C + 0,01% Mg]	Сплав нісил [(94,98 - 95,53) % Ni + 0,02 % Cr + + (4,2 - 4,6) % Si + + 0,15 % Fe+ + 0,05% C + + (0,05-0,2) %Mg]	-270...+1200	+1300

Продовження Таблиці Д2.1

1	2	3	4	5	6	7
ТХА Хромель-алюмелеві (нікель - хром/нікель - алюміній)	ХА (*K*)	*K*	Сплав хромель Т НХ9,5 (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав алюмель НМцАК2-2-1 (94,5 % Ni + 5,5 % Al, Si, Mn, Co)	-200...+1200	+1300
ТХКн Хромель-константанові (нікель - хром/мідь — нікель)	ХК(*E*)	*E*	Сплав хромель ТНХ9,5 (90,5 % Ni + 9,5 % Cr)	Сплав константан (55 % Cu+ 45 % Ni, Mn, Fe)	-200...+700	+900
ТХК Хромель-копелеві	ХК (*L*)	*L*		Сплав копельМНМц 43 - 0,5 (56 % Cu+ 44 % Ni)	-200...+600	+800
ТМК Мідь-копелеві	МК(*M*)	*M*	Мідь М1 (Cu)	Сплав копельМНМц 43-0,5 (56 % Cu+ 44 % Ni)	-200...+100	+100
ТСС Сильх-силінові	СС(*I*)	*I*	Нікелевий сплав сильхНХК 9-0,9 [(87,6-89,2)% Ni + (8,8 -9,8)% Cu + (0,6 -1,2) % Si + 1 % Mn, Fe]	Нікелевий сплав силін НК 2,4 [(91,8-92,6)% Ni + (2,0-2,8)% Si + 1 % Mn, Fe]	0...+800	+800
ТВР Вольфрамреній-вольфрамренієві	ВР(*A*)-1 ВР(*A*)-2 ВР(*A*)-3	*A*-1 *A*-2 *A*-3	Сплав вольфрамреній ВР-5 (95 % W+5% Re)	Сплав вольфрамреній ВР-20 (80 % W + 20 % Re)	0.. .+2200 0...+1800 0...+1800	+2500

Відповідно до ДСТУ 2837-94. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення. – Чинний від 01.01.97.

Примітки. 1. У дужках наведено найменування типів ТП, ухвалені Міжнародною електротехнічною комісією.

2. Хімічний склад матеріалів термоелектродів - орієнтовний.

2.2. Номінальні статичні характеристики перетворення термопар термоелектричних перетворювачів

Значення термо-ЕРС НСХ перетворення термопар ТП залежно від діапазону вимірюваних температур мають відповідати наведеним у табл. Д2.2 – Д2.4.

Таблиця Д2.2

Платинородій-платинові ТП (тип ТПП 13). Номінальна статична характеристика перетворення *R*(залежність термо-ЕРС від температури)

Темпе-ратура робочого кінця, °С	Термо-ЕРС, мВ, для температури, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-50	-0,226	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-40	-0,188	-0,192	-0,196	-0,200	-0,204	-0,208	-0,211	-0,215	-0,219	-0,223
-30	-0,145	-0,150	-0,154	-0,158	-0,163	-0,167	-0,171	-0,175	-0,180	-0,184
-20	-0,100	-0,105	-0,109	-ОД 14	-0,119	-0,123	-0,128	-0,132	-0,137	-0,141
-10	-0,051	-0.056	-0,061	-0,066	-0,071	-0,076	-0,081	-0,086	-0,091	-0,095
0	0.000	-0,005	-0,011	-0,016	-0,021	-0,026	-0,031	-0,036	-0,041	-0,046
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,021	0,027	0,032	0,038	0,043	0,049
10	0,054	0,060	0,065	0,071	0,071	0,082	0,088	0,094	0,100	0,105
20	0,111	0,117	0,123	0,129	0,135	0,141	0,147	0,153	0,159	0,165
30	0,171	0,177	0,183	0,189	0,195	.0,201	0,207	0,214	0,220	0,226
40	0,232	0,239	0,245	0,251	0,258	0,264	0,271	0,277	0,284	0,290
50	0,296	0,303	0,310	0,316	0,323	0,329	0,336	0,343	0,349	0,356
60	0,363	0,369	0,376	0,383	0,390	0,397	0,403	0,410	0,417	0,424
70	0,431	0,438	0,445	0,457	0,459	0,466	0.473	0,480	0,487	0,494
80	0,501	0,508	0,516	0,523	0,530	0,537	0,544	0,552	0,559	0,566
90	0,573	0,581	0,588	0,595	0,603	0,610	0,618	0,625	0,632	0,640
100	0,647	0,655	0,662	0.670	0,677	0,685	0,693	0,700	0,708	0,715
110	0,723	0,731	0,738	0,746	0.754	0,761	0,769	0,777	0,785	0,792
120	0,800	0,808	0,816	0,824	0,832	0,839	0,847	0,855	0,863	0,871
130	0,879	0,887	0,895	0,903	0,911	0,919	0,927	0,935	0,943	0,951
140	0,959	0,967	0,976	0,984	0,992	1,000	1,008	1,016	1,025	1,033
150	1,041	1,049	1,058	1,066	1,074	1,082	1,091	1,099	1,107	1,116
160	1,124	1,132	1,141	1,149	1,158	1,166	1,175	1,183	1,191	1,200
170	1,208	1,217	1,225	1,234	1,242	1,251	1,260	1,268	1,277	1,285
180	1,294	1,303	1,311	1,320	1,329	1,337	1,346	1,355	1,363	1,372
190	1,381	1,389	1,398	1,407	1,416	1,425	1,433	1,442	1,451	1,460
200	1,469	1,477	1,486	1,495	1,504	1,513	1,522	1,531	1,540	1,549
210	1,558	1,567	1,575	1,584	1,593	1,602	1,611	1,620	1,629	1,639
220	1,648	1,657	1,666	1,675	1,684	1,693	1,702	1,711	1,720	1,729
230	1,739	1,748	1,757	1,766	1,775	1,784	1,794	1,803	1,812	1,821
240	1,831	1,840	1,849	1,858	1,868	1,877	1,886	1,895	1,905	1,914
250	1,923	1,933	1,942	1,951	1,961	1,970	1,980	1,989	1,998	2,008
260	2,017	2,027	2,036	2,046	2,055	2,064	2,074	2,083	2,093	2,102
270	2,112	2,121	2,131	2,140	2,150	2,159	2,169	2,179	2,188	2,198
280	2,207	2,217	2,226	2,236	2,246	2,255	2,265	2,275	2,284	2,294
290	2,304	2,313	2,323	2,333	2,342	2,352	2,362	2,371	2,381	2,391
300	2,401	2,410	2,420	2,430	2,440	2,449	2,459	2,469	2,479	2,488
310	2,498	2,508	2,518	2,528	2,538	2.547	2,557	2,567	2,577	2,587
320	2,597	2,607	2,617	2,626	2,636	2,646	2,656	2,666	2,676	2,686
330	2,696	2,706	2,716	2,726	2,736	2,746	2,756	2,766	2,776	2,786
340	2,796	2,806	2,816	2,826	2,836	2,846	2,856	2,866	2,876	2,886
350	2,896	2,906	2,916	2,926	2,937	2,947	2,957	2,967	2,977	2,987
360	2,997	3,007	3,018	3,028	3,038	3,048	3,058	3,068	3,079	3,089
370	3,099	3,109	3,119	3,130	3,140	3,150	3,160	3,171	3,181	3,191
380	3,201	3,212	3,222	3,232	3,242	3,253	3,263	3,273	3,284	3,294
390	3,304	3,315	3,325	3,335	3,346	3,356	3,366	3,377	3,387	3,397
400	3,408	3,418	3,428	3,439	3,449	3,460	3,470	3,480	3,491	3,501
410	3,512	3,522	3,533	3,543	3,553	3,564	3,574	3,585	3,595	3,606
420	3,616	3,627	3,637	3,648	3,658	3,669	3,679	3,690	3,700	3,711
430	3,721	3,732	3,742	3,753	3,764	3,774	3,785	3,795	3,806	3,816

Продовження Таблиці Д2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
440	3,827	3,838	3,848	3,859	3,869	3,880	3,891	3,901	3,912	3,922
450	3,933	3,944	3,954	3,965	3,976	3,986	3,997	4,008	4,018	4,029
460	4,040	4,050	4,061	4,072	4,083	4,093	4,104	4,115	4,125	4,136
470	4,147	4,158	4,168	4,179	4,190	4,201	4,211	4,222	4,233	4,244
480	4,255	4,265	4,276	4,287	4,298	4,309	4,319	4,330	4,341	4,352
490	4,363	4,373	4,384	4,395	4,406	4,417	4,428	4,439	4,449	4,460
500	4,471	4,482	4,493	4,504	4,515	4,526	4,537	4,548	4,558	4,569
510	4,580	4,591	4,602	4,613	4,624	4,635	4,646	4,657	4,668	4,679
520	4,690	4,701	4,712	4,723	4,734	4,745	4,756	4,767	4,778	4,789
530	4,800	4,811	4,822	4,833	4,844	4,855	4,866	4,877	4,888	4,899
540	4,910	4,922	4,933	4,944	4,955	4,966	4,977	4,988	4,999	5,010
550	5,021	5,033	5,044	5,055	5,066	5,077	5,088	5,099	5,111	5,122
560	5,133	5,144	5,155	5,166	5,178	5,189	5,200	5,211	5,222	5,234
570	5,245	5,256	5,267	5,279	5,290	5,301	5,312	5,323	5,335	5,346
580	5,357	5,369	5,380	5,391	5,402	5,414	5,425	5,436	5,448	5,459
590	5,470	5,481	5,493	5,504	5,515	5,527	5,538	5,549	5,561	5,572
600	5,583	5,595	5,606	5,618	5,629	5,640	5,652	5,663	5,674	5,686
610	5,697	5,709	5,720	5,731	5,743	5,754	5,766	5,777	5,789	5,800
620	5,812	5,823	5,834	5,846	5,857	5,869	5,880	5,892	5,903	5,915
630	5,926	5,938	5,949	5,961	5,972	5,984	5,995	6,007	6,018	6,030
640	6,041	6,053	6,065	6,076	6,088	6,099	6,111	6,122	6,134	6,146
650	6,157	6,169	6,180	6,192	6,204	6,215	6,227	6,238	6,250	6,262
660	6,273	6,285	6,297	6,308	6,320	6,332	6,343	6,355	6,367	6,378
670	6,390	6,402	6,413	6,425	6,437	6,448	6,460	6,472	6,484	6,495
680	6,507	6,519	6,531	6,542	6,554	6,566	6,578	6,589	6,601	6,613
690	6,625	6,636	6,648	6,660	6,672	6,684	6,695	6,707	6,719	6,731
700	6,743	6,755	6,766	6,778	6,790	6,802	6,814	6,826	6,838	6,849
710	6,861	6,873	6,885	6,897	6,909	6,921	6,933	6,945	6,956	6,968
720	6,980	6,992	7,004	7,016	7,028	7,040	7,052	7,064	7,076	7,088
730	7,100	7,112	7,124	7,136	7,148	7,160	7,172	7,184	7,196	7,208
740	7,220	7,232	7,244	7,256	7,268	7,280	7,292	7,304	7,316	7,328
750	7,340	7,352	7,364	7,376	7,389	7,401	7,413	7,425	7,437	7,449
760	7,461	7,473	7,485	7,498	7,510	7,522	7,534	7,546	7,558	7,570
770	7,583	7,595	7,607	7,619	7,631	7,644	7,656	7,668	7,680	7,692
780	7,705	7,717	7,729	7,741	7,753	7,766	7,778	7,790	7,802	7,815
790	7,827	7,839	7,851	7,864	7,876	7,888	7,901	7,913	7,925	7,938
800	7,950	7,962	7,974	7,987	7,999	8,011	8,024	8,036	8,048	8,061
810	8,073	8,086	8,098	8,110	8,123	8,135	8,147	8,160	8,172	8,185
820	8,197	8,209	8,222	8,234	8,247	8,259	8,272	8,284	8,296	8,309
830	8.321	8,334	8,346	8,359	8,371	8,384	8,396	8,409	8,421	8,434
840	8,446	8,459	8,471	8,484	8,496	8,509	8,521	8,534	8,546	8,559
850	8,571	8,584	8,597	8,609	8,622	8,634	8,647	8,659	8,672	8,685
860	8,697	8,710	8,722	8,735	8,748	8,760	8,773	8,785	8,798	8,811
870	8,823	8,836	8,849	8,861	8,874	8,887	8,899	8,912	8,925	8,937
880	8,950	8,963	8,975	8,988	9,001	9,014	9,026	9,039	9,052	9,065
890	9,077	9,090	9,103	9,115	9,128	9,141	9,154	9,167	9,179	9,192
900	9,205	9,218	9,230	9,243	9,256	9,269	9,282	9,294	9,307	9,320
910	9,333	9,346	9,359	9,371	9,384	9,397	9,410	9,423	9,436	9,449
920	9,461	9,474	9,487	9,500	9,513	9,526	9,539	9,552	9,565	9,578
930	9,590	9,603	9,616	9,629	9,642	9,655	9,668	9,681	9,694	9,707
940	9,720	9,733	9,746	9,759	9,772	9,785	9,798	9,811	9,824	9,837
950	9,850	9,863	9,876	9,889	9,902	9,915	9,928	9,941	9,954	9,967
960	9,980	9,993	10,006	10,019	10,032	10,046	10,059	10,072	10,085	10,098
970	10,111	10,124	10,137	10,150	10,163	10,177	10,190	10,203	10,216	10,229
980	10,242	10,255	10,268	10,282	10,295	10,308	10,321	10,334	10,347	10,361
990	10,374	10,387	10,400	10,413	10,427	10,440	10,453	10,466	10,480	10,493

Продовження Таблиці Д2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1000	10,506	10,519	10,532	10,546	10,559	10,572	10,585	10,599	10,612	10,625
1010	10,638	10,652	10,665	10,678	10,692	10,705	10,718	10,731	10,745	10,758
1020	10,771	10,785	10,798	10,811	10,825	10,838	10,851	10,865	10,878	10,891
1030	10,905	10,918	10,932	10,945	10,958	10,972	10,985	10,998	11,012	11,025
1040	11,039	11,052	11,065	11,079	11,092	11,106	11,119	11,132	11,146	11,159
1050	11,173	11,186	11,200	11,213	11,227	11,240	11,253	11,267	11,280	11,294
1060	11,307	11,321	11,334	11,348	11,361	11,375	11,388	11,402	11,415	11,429
1070	11,442	11,456	11,469	11,483	11,496	11,510	11,524	11,537	11,551	11,564
1080	11,578	11,591	11,605	11,618	11,632	11,646	11,659	11,673	11,686	11,700
1090	11,714	11,727	11,741	11,754	11,768	11,782	11,795	11,809	11,822	11,836
1100	11,850	11,863	11,877	11,891	11,904	11,918	11,931	11,945	11,959	11,972
1110	11,986	12,000	12,013	12,027	12,041	12,054	12,068	12,082	12,096	12,109
1120	12,123	12,137	12,150	12,164	12,178	12,191	12,205	12,219	12,233	12,246
1130	12,260	12,274	12,288	12,301	12,315	12,329	12,342	12,356	12,370	12,384
1140	12,397	12,411	12,425	12,439	12,453	12,466	12,480	12,494	12,508	12,521
1150	12,535	12,549	12,563	12,577	12,590	12,604	12,618	12,632	12,646	12,659
1160	12,673	12,687	12,701	12,715	12,729	12,742	12,756	12,770	12,784	12,798
1170	12,812	12,825	12,839	12,853	12,867	12,881	12,895	12,909	12,922	12,936
1180	12,950	12,964	12,978	12,992	13,006	13,019	13,033	13,047	13,061	13,075
1190	13,089	13,103	13,117	13,131	13,145	13,158	13,172	13,186	13,200	13,214
1200	13,228	13,242	13,256	13,270	13,284	13,298	13,311	13,325	13,339	13,353
1210	13,367	13,381	13,395	13,409	13,423	13,437	13,451	13,465	13,479	13,493
1220	13,507	13,521	13,535	13,549	13,563	13,577	13,590	13,604	13,618	13,632
1230	13,646	13,660	13,674	13,688	13,702	13,716	13,730	13,744	13,758	13,772
1240	13,786	13,800	13,814	13,828	13,842	13,856	13,870	13,884	13,898	13,912
1250	13,926	13,940	13,954	13,968	13,982	13,996	14,010	14,024	14,038	14,052
1260	14,066	14,081	14,095	14,109	14,123	14,137	14,151	14,165	14,179	14,193
1270	14,207	14,221	14,235	14,249	14,263	14,277	14,291	14,305	14,319	14,333
1280	14,347	14,361	14,375	14,390	14,404	14,418	14,432	14,446	14,460	14,474
1290	14,488	14,502	14,516	14,530	14,544	14,558	14,572	14,586	14,601	14,615
1300	14,629	14,643	14,657	14,671	14,685	14,699	14,713	14,727	14,741	14,755
1310	14,770	14,784	14,798	14,812	14,826	14,840	14,854	14,868	14,882	14,896
1320	14,911	14,925	14,939	14,953	14,967	14,981	14,995	15,009	15,023	15,037
1330	15,052	15,066	15,080	15,094	15,108	15,122	15,136	15,150	15,164	15,179
1340	15,193	15,207	15,221	15,235	15,249	15,263	15,277	15,291	15,306	15,320
1350	15,334	15,348	15,362	15,376	15,390	15,404	15,419	15,433	15,447	15,461
1360	15,475	15,489	15,503	15,517	15,531	15,546	15,560	15,574	15,588	15,602
1370	15,616	15,630	15,645	15,659	15,673	15,687	15,701	15,715	15,729	15,743
1380	15,758	15,772	15,786	15,800	15,814	15,828	15,842	15,856	15,871	15,885
1390	15,899	15,913	15,927	15,941	15,955	15,969	15,984	15,998	16,012	16,026
1400	16,040	16,054	16,068	16,082	16,097	16,111	16,125	16,139	16,153	16,167
1410	16,181	16,196	16,210	16,224	16,238	16,252	16,266	16,280	16,294	16,309
1420	16,323	16,337	16,351	16,365	16,379	16,393	16,407	16,422	16,436	16,450
1430	16.464	16,478	16,492	16,506	16,520	16,534	16,549	16,563	16,577	16,591
1440	16,605	16,619	16,633	16,647	16,662	16,676	16,690	16,704	16,718	16,732
1450	16,746	16,760	16,774	16,789	16,803	16,817	16,831	16,845	16,859	16,873
1460	16,887	16,901	16,915	16,930	16,944	16,958	16,972	16,986	17,000	17,014
1470	17,028	17,042	17,056	17,071	17,085	17,099	17,113	17,127	17,141	17,155
1480	17,169	17,183	17,197	17,211	17,225	17,240	17,254	17,268	17,282	17,296
1490	17,310	17,324	17,338	17,352	17,366	17,380	17,394	17,408	17,423	17,437
1500	17,451	17,465	17,479	17,493	17,507	17,521	17,535	17,549	17,563	17,577
1510	17,591	17,605	17,619	17,633	17,647	17,661	17,676	17,690	17,704	17,718

Продовження Таблиці Д2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1520	17,732	17,746	17,760	17,774	17,788	17,802	17,816	17,830	17,844	17,858
1530	17,872	17,886	17,900	17,914	17,928	17,942	17,956	17,970	17,984	17,998
1540	18,012	18,026	18,040	18,054	18,068	18,082	18,096	18,110	18,124	18,138
1550	18,152	18,166	18,180	18,194	18,208	18,222	18,236	18,250	18,264	18,278
1560	18,292	18,306	18,320	18,334	18,348	18,362	18,376	18,390	18,404	18,417
1570	18,431	18,445	18,459	18,473	18,487	18,501	18,515	18,529	18,543	18,557
1580	18,571	18,585	18,599	18,613	18,627	18,640	18,654	18,668	18,682	18,696
1590	18,710	18,724	18,738	18,752	18,766	18,779	18,793	18,807	18,821	18,835
1600	18,849	18,863	18,877	18,891	18,904	18,918	18,932	18,946	18,960	18,974
1610	18,998	19,002	19,015	19,029	19,043	19,057	19,071	19,085	19,098	19,112
1620	19,126	19,140	19,154	19,168	19,181	19,195	19,209	19,223	19,237	19,250
1630	19,264	19,278	19,292	19,306	19,319	19,333	19,347	19,361	19,375	19,388
1640	19,402	19,416	19,430	19,444	19,457	19,471	19,485	19,499	19,512	19,526
1650	19,540	19,554	19,567	19,581	19,595	19,609	19,622	19,636	19,650	19,663
1660	19,677	19,691	19,705	19,718	19,732	19,746	19,759	19,773	19,787	19,800
1670	19,814	19,828	19,841	19,855	19,869	19,882	19,896	19,910	19,923	19,937
1680	19,951	19,964	19,978	19,992	20,005	20,019	20,032	20,046	20,060	20,073
1690	20,087	20,100	20,114	20,127	20,141	20,154	20.168	20,181	20,195	20,208
1700	20,222	20,235	20,249	20,262	20,275	20,289	20,302	20,316	20,329	20,342
1710	20.356	20,369	20,382	20,396	20,409	20,422	20,436	20,449	20,462	20,475
1720	20,488	20,502	20,515	20,528	20,541	20,554	20,567	20,581	20,594	20,607
1730	20,620	20,633	20,646	20,659	20,672	20,685	20,698	20,711	20,724	20,736
1740	20,749	20,762	20,775	20,788	20,801	20,813	20,826	20,839	20,852	20,864
1750	20,877	20,890	20,902	20,915	20,928	20,940	20,953	20,965	20,978	20,990
1760	21,003	21,015	21,027	21,040	21,052	21,065	21,077	21,089	21,101	-

Таблиця Д2.3

Хромель-алюмелеві ТП (тип ТХА). Номінальна статична характеристика перетворення К (залежність термо-ЕРС від температури)

Температура робочого кіпця, °С	Тсрмо-ЕРС, мВ, для температури, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-270	-6,458	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-260	-6,441	-6,444	-6,446	-6,448	-6,450	-6,452	-6,453	-6,455	-6,456	-6,457
-250	-6,404	-6,408	-6,412	-6,417	-6,421	-6,425	-6,429	-6,432	-6,435	-6,438
-240	-6,344	-6,351	-6,357	-6,364	-6,370	-6,377	-6,382	-6,388	-6,393	-6,399
-230	-6,262	-6,271	-6,280	-6,289	-6,297	-6,306	-6,314	-6,322	-6,329	-6,337
-220	-6,158	-6,170	-6,182	-6,192	-6,202	-6,213	-6,223	-6,233	-6,243	-6,252
-210	-6,035	-6,048	-6,061	-6,074	-6,087	-6,099	-6,111	-6,123	-6,135	-6,147
-200	-5,891	-5,907	-5,921	-5,936	-5,951	-5,965	-6,980	-6,994	-6,007	-6,021
-190	-5,730	-5,747	-5,763	-5,780	-5,797	-5,813	-5,829	-5,845	-5,861	-5,876
-180	-5,550	-5,569	-5,587	-5,606	-5,624	-5,642	-5,660	-5,678	-5,695	-5.713
-170	-5,354	-5,374	-5,394	-5,415	-5,435	-5,454	-5,474	-5,493	-5,512	-5,531
-160	-5,141	-5,163	-5,185	-5,207	-5,228	-5,250	-5,271	-5,292	-5,313	-5,333
-150	-4,913	-4,936	-4,959	-4,983	-5,006	-5,029	-5,052	-5,074	-5,097	-5,119
-140	-1,669	-4,694	-4,719	-4,744	-4,768	-4,793	-4,817	-4,841	-4,865	-4,889
-130	-4,411	-4,437	-4,463	-4,490	-4,516	-4,542	-4,567	-4,593	-4,618	-4,644

Продовження Таблиці Д2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-120	-4,138	-4,166	-4,194	-4,221	-4,249	-4,276	-4,303	-4,330	-4,357	-4,384
-110	-3,852	-3,882	-3,911	-3,939	-3,968	-3,997	-4,025	-4,054	-4,082	-4,110
-100	-3,554	-3,584	-3,614	-3,645	-3,675	-3,705	-3,734	-3,764	-3,794	-3,823
-90	-3,243	-3,274	-3,306	-3,337	-3,368	-3,400	-3,431	-3,462	-3,492	-3,523
-80	-2,920	-2,953	-2,986	-3,018	-3,050	-3,083	-3,115	-3,147	-3,179	-3,211
-70	-2,587	-2,620	-2,654	-2,688	-2,721	-2,755	-2,788	-2,821	-2,854	-2,887
-60	-2,243	-2,278	-2,312	-2,347	-2,382	-2,416	-2,450	-2,485	-2,519	-2,553
-50	-1,889	-1,925	-1,961	-1,996	-2,032	-2,067	-2,103	-2,138	-2,173	-2,208
-40	-1,527	-1,564	-1,600	-1,637	-1,673	-1,709	-1,745	-1,782	-1,818	-1,854
-30	-1,156	-1,194	-1,231	-1,268	-1,305	-1,343	-1,380	-1,417	-1,453	-1,490
-20	-0,778	-0,816	-0,854	-0,892	-0,930	-0,968	-1,006	-1,043	-1,081	-1,119
-10	-0,392	-0,431	-0,470	-0,508	-0,547	-0,586	-0,624	-0,663	-0,701	-0,739
0	0,000	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163
ЗО	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982
50	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055
100	4,096	4,138	4,179	4,220	4,262	4,303	4,344	4,385	4,427	4,468
110	4,509	4,550	4,591	4,633	4,674	4,715	4,756	4,797	4,838	4,879
120	4,920	4,961	5,002	5,043	5,084	5,124	5,165	5,206	5,247	5,288
120	4,920	4,961	5,002	5,043	5,084	5,124	5,165	5,206	5,247	5,288
130	5,328	5,369	5,410	5,450	5,491	5,532	5,572	5,613	5,653	5,694
140	5,735	5,775	5,815	5,856	5,896	5,937	5,977	6,017	6,058	6,098
150	6,138	6,179	6,219	6,259	6,299	6,339	6,380	6,420	6,460	6,500
160	6,540	6,580	6,620	6,660	6,701	6,741	6,781	6,821	6,861	6,901
170	6,941	6,981	7,021	7,060	7,100	7,140	7,180	7,220	7,260	7,300
180	7,340	7,380	7,420	7,460	7,500	7,540	7,579	7,619	7,659	7,699
190	7,739	7,779	7,819	7,859	7,899	7,939	7,979	8,019	8,059	8,099
200	8,138	8,178	8,218	8,258	8,298	8,338	8,378	8,418	8,458	8,499
210	8,539	8,579	8,619	8,659	8,699	8,739	8,779	8,819	8,860	8,900
220	8,940	8,980	9,020	9,061	9,101	9,141	9,181	9,222	9,262	9,302
230	9,343	9,383	9,423	9,464	9,504	9,545	9,585	9,626	9,666	9,707
240	9,747	9,788	9,828	9,869	9,909	9,950	9,991	10,031	10,072	10,113
250	10,153	10,194	10,235	10,276	10,316	10,375	10,398	10,439	10,480	10,520
260	10,561	10,602	10,643	10,684	10,725	10,766	10,807	10,848	10,889	10,930
270	10,971	11,012	11,053	11,094	11,135	11,176	11,217	11,259	11,300	11,341
280	11,382	11,423	11,465	11,506	11,547	11,588	11,630	11,671	11,712	11,753
290	11,795	11,836	11,877	11,919	11,960	12,001	12,043	12,084	12,126	12,167
300	12,209	12,250	12,291	12,333	12,374	12,416	12,457	12,499	12,540	12,582'
310	12,624	12,665	12,707	12,748	12,790	12,831	12,873	12,915	12,956	12,998
320	13,040	13,081	13,123	13,165	13,206	13,248	13,290	13,331	13,373	13,415

Продовження Таблиці Д2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
330	13,457	13,498	13,540	13,582	13,624	13,665	13,707	13,749	13,791	13,833
340	13,874	13,916	13,958	14,000	14,042	14,084	14,126	14,167	14,209	14,251
350	14,293	14,335	14,377	14,419	14,461	14,503	14,545	14,587	14,629	14,671
360	14,713	14,755	14,797	14,839	14,881	14,923	14,965	15,007	15,049	15,091
370	15,133	15,175	15,217	15,259	15,301	15,343	15,385	15,427	15,469	15,511
380	15,554	15,596	15,638	15,680	15,722	15,764	15,806	15,849	15,891	15,933
390	15,975	16,017	16,059	16,102	16,144	16,186	16,228	16,270	16,313	16,355
400	16,397	16,439	16,482	16,524	16,566	16,608	16,651	16,693	16,735	16,778
410	16,820	16,862	16,904	16,947	16,989	17,031	17,074	17,116	17,158	17,201
420	17,243	17,285	17,328	17,370	17,413	17,455	17,497	17,540	17,582	17,624
430	17,667	17,709	17,752	17,794	17,837	17,879	17,921	17,964	18,006	18,049
440	18,091	18,134	18,176	18,218	18,261	18,303	18,346	18,388	18,431	18,473
450	18,516	18,558	18,601	18,643	18,686	18,728	18,771	18,813	18,856	18,898
460	18,941	18,983	19,026	19,068	19,111	19,154	19,196	19,239	19,281	19,324
470	19,366	19,409	19,451	19,494	19,537	19,579	19,622	19,664	19,707	19,750
480	19,792	19,835	19,877	19,920	19,962	20,005	20,048	20,090	20,133	20,175
490	20,218	20,261	20,303	20,346	20,389	20,431	20,474	20,516	20,559	20,602
500	20,644	20,687	20,730	20,772	20,815	20,857	20,900	20,943	20,985	21,028
510	21,071	21,113	21,156	21,199	21,241	21,284	21,326	21,369	21,412	21,454
520	21,497	21,540	21,582	21,625	21,668	21,710	21,753	21,796	21,838	21,881
530	21,924	21,966	22,009	22,052	22,094	22,137	22,179	22,222	22,265	22,307
540	22,350	22,393	22,435	22,478	22,521	22,563	22,606	22,649	22,691	22,734
550	22,776	22,819	22,862	22,904	22,947	22,990	23,032	23,075	23,117	23,160
560	23,203	23,245	23,288	23,331	23,373	23,416	23,458	23,501	23,544	23,586
570	23,629	23,671	23,714	23,757	23,799	23,842	23,884	23,927	23,970	24,012
580	24,055	24,097	24,140	24,182	24,225	24,267	24,310	24,353	24,395	24,438
590	24,480	24,523	24,565	24,608	24,650	24,693	24,735	24,778	24,820	24,863
600	24,905	24,948	24,990	25,033	25,075	25,118	25,160	25,203	25,245	25,288
610	25,330	25,373	25,415	25,458	25,500	25,543	25,585	25,627	25,670	25,712
620	25,755	25,797	25,840	25,882	25,924	25,967	26,009	26,052	26,094	26,136
630	26,179	26,221	26,263	26,306	26,348	26,390	26,433	26,475	26,517	26,560
640	26,602	26,644	26,687	26,729	26,771	26,814	26,856	26,898	26,940	26,983
650	27,025	27,067	27,109	27,152	27,194	27,236	27,278	27,320	27,363	27,405
660	27,447	27,489	27,531	27,574	27,616-	27,658	27,700	27,742	27,784	27,826
670	27,869	27,911	27,953	27,995	28,037	28,079	28,121	28,163	28,205	28,247
680	28,289	28,332	28,374	28,416	28,458	28,500	28,542	28,584	28,626	28,668
690	28,710	28,752	28,794	28,835	28,877	28,919	28,961	29,003	29,045	29,087
700	29,129	29,171	29,213	29,255	29,297	29,338	29,380	29,422	29,464	29,506
710	29,548	29,589	29,631	29,673	29,715	29,757	29,798	29,840	29,882	29,924
720	29,965	30,007	30,049	30,090	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341
730	30,382	30,424	30,466	30,507	30,549	30,590	30,632	30,674	30,715	30,757
740	30,798	30,840	30,881	30,923	30,964	31,006	31,047	31,089	31,130	31,172
750	31,213	31,255	31,296	31,338	31,376	31,421	31,462	31,504	31,545	31,586
760	31,628	31,669	31,710	31,752	31,793	31,834	31,876	31,917	31,958	32,000
770	32,041	32,082	32,124	32,165	32,206	32,247	32,289	32,330	32,371	32,412

Продовження Таблиці Д2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
780	32,453	32,495	32,536	32,577	32,618	32,659	32,700	32,742	32,783	32,824
790	32,865	32,906	32,947	32,988	33,029	33,070	33,111	33,152	33,193	33,234
800	33,275	33,316	33,357	33,398	33,439	33,480	33,521	33,562	33,603	33,644
810	33,685	33,726	33,767	33,808	33,848	33,889	33,930	33,971	34,012	34,053
820	34,093	34,134	34,175	34,216	34,257	34,297	34,338	34,379	34,420	34,460
830	34,501	34,542	34,582	34,623	34,664	34,704	34,745	34,786	34,826	34,867
840	34,908	34,948	34,989	35,029	35,070	35,110	35,151	35,192	35,232	35,273
850	35,313	35,354	35,394	35,435	35,475	35,516	35,556	35,596	35,637	35,677
860	35,718	35,758	35,798	35,839	35,879	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,484
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,685	36,725	36,765	36,805	36,845	36,885
890	36,925	36,965	37,006	37,046	37,086	37,126	37,166	37,206	37,246	37,286
900	37,326	37,366	37,406	37,446	37,486	37,526	37,566	37,606	37,646	37,686
910	37,725	37,765	37,805	37,845	37,885	37,925	37,965	38,005	38,044	38,084
920	38,124	38,164	38,204	38,243	38,283	38,323	38,363	38,402	38,442	38,482
930	38,522	38,561	38,601	38,641	38,680	38,720	38,760	38,799	38,839	38,878
940	38,918	38,958	38,997	39,037	39,076	39,116	39,155	39,195	39,235	39,274
950	39,314	39,353	39,393	39,432	39,471	39,511	39,550	39,590	39,629	39,669
960	39,708	39,747	39,787	39,826	39,866	39,905	39,944	39,984	40,023	40,062
970	40,101	40,141	40,180	40,219	40,259	40,298	40,337	40,376	40,415	40,455
980	40,494	40,533	40,572	40,611	40,651	40,690	40,729	40,768	40,807	40,846
990	40,885	40,924	40,963	41,002	41,042	41,081	41,120	41,159	41,198	41,237
1000	41,267	41,315	41,354	41,393	41,431	41,470	41,509	41,548	41,587	41,626
1010	41,665	41,704	41,743	41,781	41,820	41,859	41,898	41,937	41,976	42,014
1020	42,053	42,092	42,131	42,169	42,208	42,247	42,286	42,324	42,363	42,402
1030	42,440	42,479	42,518	42,556	42,595	42,633	42,672	42,711	42,749	42,788
1040	42,826	42,865	42,903	42,942	42,980	43,019	43,057	43,096	43,134	43,173
1050	43,211	43,250	43,288	43,327	43,365	43,403	43,442	43,480	43,518	43,557
1060	43,595	43.633	43,672	43,710	43,748	43,787	43,825	43,863	43,901	43,940
1070	43,978	44,016	44,054	44,092	44,130	44,169	44,207	44,245	44,283	44,321
1080	44,359	44,397	44,435	44,473	44,512	44,550	44,588	44,626	44,664	44,702
1090	44,740	44,778	44,816	44,853	44,891	44,929	44,967	45,005	45,043	45,081
1100	45,119	45,157	45,194	45,232	45,270	45,308	45,346	45,383	45,421	45,459
1110	45,497	45,534	45,572	45,610	45,647	45,685	45,723	45,760	45,798	45,836
1120	45,873	45,911	45,948	45,986	46,024	46,061	46,099	46,136	46,174	46,211
1130	46,249	46,286	46,324	46,361	46,398	46,436	46,473	46,511	46,548	46,585
1140	46,623	46,660	46,697	46,735	46,772	46,809	46,847	46,884	46,921	46,958
1150	46,995	47,033	47,070	47,107	47,144	47,181	47,218	47,256	47,293	47,330
1160	47,367	47,404	47,441	47,478	47,515	47,552	47,589	47,626	47,663	47,700
1170	47,737	47,774	47,811	47,848	47,884	47,921	47,958	47,995	48,032	48,069
1180	48,105	48,142	48,179	48,216	48,252	48,289	48,326	48,363	48,399	48,436
1190	48,473	48,509	48,546	48,582	48,619	48,656	48,692	48,729	48,765	48,802
1200	48,838	48,875	48,911	48,948	48,984	49,021	49,057	49,093	49,130	49,166
1210	49,202	49,239	49,275	49,311	49,348	49,384	49,420	49,456	49,493	49,529

Продовження Таблиці Д2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1220	49,565	49,601	49,637	49,674	49,710	49,746	49,782	49,818	49,854	49,890
1230	49,926	49,962	49,998	50,034	50,070	50,106	50,142	50,178	50,214	50,250
1240	50,286	50,322	50,358	50,393	50,429	50,465	50,501	50,537	50,572	50,608
1250	50,644	50,680	50,715	50,751	50,787	50,822	50,858	50,894	50,929	50,965
1260	51,000	51,036	51,071	51,107	51,142	51,178	51,213	51,249	51,284	51,320
1270	51,355	51,391	51,426	51,461	51,497	51,532	51,567	51,603	51,638	51,673
1280	51,708	51,744	51,779	51,814	51,849	51,885	51,920	51,955	51,990	52,025
1290	52,060	52,095	52,130	52,165	52,200	52,235	52,270	52,305	52,340	52,375
1300	52,410	52,445	52,480	52,515	52,550	52,585	52,620	52,654	52,689	52,724
1310	52,759	52,794	52,828	52,863	52,898	52,932	52,967	53,002	53,037	53,071
1320	53,106	53,140	53,175	53,210	53,244	53,279	53,313	53,348	53,382	53,417
1330	53,451	53,486	53,520	53,555	53,589	53,623	53,658	53,692	53,727	53,761
1340	53,795	53,830	53,864	53,898	53,932	53,967	54,001	54,035	54,069	54,104
1350	54,138	54,172	54,206	54,240	54,274	54,308	54,343	54,377	54,411	54,445
1360	54,479	54,513	54,547	54,581	54,615	54,649	54,683	54,717	54,751	54,785
1370	54,819	54,852	54,886	-	-	-	-	-	-	-

Таблиця Д 2.4.

Хромель-копелевіТП (тип ТХК). Номінальна статична характеристика перетворення *L*(залежність термо-ЕРС від температури)

Темпе-ратура робочого кінця, °С	Термо-ЕРС, мВ, для температури, °С .									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-200	-9,488	-9,515	-9,542	-9,569	-9,595	-9,621	-9,647	-9,673	-9,698	-9,723
-190	-9,203	-9,233	-9,262	-9,291	-9,320	-9,349	-9,377	-9,405	-9,433	-9,461
-180	-8,895	-8,927	-8,958	-8,990	-9,021	-9,052	-9,083	-9,113	-9,144	-9,174
-170	-8,563	-8,597	-8,631	-8,665	-8,698	-8,732	-8,765	-8,797	-8,830	-8,863
-160	-8,208	-8,244	-8,280	-8,317	-8,352	-8,388	-8,423	-8,458	-8,493	-8,528
-150	-7,831	-7,870	-7,908	-7,946	-7,984	-8,022	-8,060	-8,097	-8,134	-8,171
-140	-7,433	-7,473	-7,514	-7,554	-7,594	-7,634	-7,674	-7,714	-7,753	-7,792
-130	-7,014	-7,057	-7,099	-7,142	-7,184	-7,226	-7,268	-7,309	-7,351	-7,392
-120	-6,575	-6,620	-6,665	-6,709	-6,753	-6,797	-6,841	-6,884	-6,928	-6,971
-110	-6,117	-6,164	-6,210	-6,257	-6,303	-6,349	-6,394	-6,440	-6,485	-6,530
-100	-5,641	-5,689	-5,738	-5,786	-5,834	-5,881	-5,929	-5,976	-6,024	-6,071
-90	-5,147	-5,197	-5,247	-5,297	-5,346	-5,396	-5,445	-5,494	-5,543	-5,592
-80	-4,635	-4,687	*-4,139*	-4,790	-4,842	-4,893	-4,944	-4,995	-5,046	-5,096
-70	-4,107	-4,161	-4,214	-4,267	-4,320	-4,313	-4,426	-4,479	-4,531	-4,583
-60	-3,564	-3,619	-3,674	-3,728	-3,783	-3,837	-3,892	-3,946	-4,000	-4,054
-50	-3,004	-3,061	-3,117	-3,174	-3,230	-3,286	-3,342	-3,397	-3,453	-3,508
-40	-2,431	-2,489	-2,547	-2,604	-2,662	-2,719	-2,777	-2,834	-2,891	-2,948
-30	-1,843	-1,902	-1,962	-2,021	-2,080	-2,139	-2,197	-2,256	-2,314	-2,373
-20	-1,241	-1,302	-1,363	-1,423	-1,484	-1,544	-1,604	-1,664	-1,724	-1,783

Продовження Таблиці Д2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-10	-0,627	-0,689	-0,751	-0,813	-0,874	-0,936	-0,997	-1,059	-1,120	-1,181
0	0,000	-0,063	-0,126	-0,189	-0,252	-0,315	-0,378	-0,440	-0,503	-0,565
0	0,000	0,063	0.127	0,190	0,254	0,318	0,382	0,446	0,510	0,574
10	0,639	0,703	0,768	0,833	0,898	0,963	1,028	1,093	1,158	1,224
20	1,289	1,355	1,421	1,487	1,553	1,619	1,685	1,751	1,818	1,884
30	1,951	2,018	2,085	2,152	2,219	2,286	2,353	2,421	2,488	2,556
40	2,623	2,691	2,759	2,827	2,895	2,964	3,032	3,100	3,169	3,237
50	3,306	3,375	3,444	3,513	3,582	3,651	3,721	3,790	3,859	3,929
60	3,999	4,069	4,138	4,208	4,279	4,349	4,419	4,489	4,560	4,630
70	4,701	4,772	4,842	4,913	4,984	5,056	5,127	5,198	5,269	5,341
80	5,412	5,484	5,556	5,628	5,699	5,771	5,843	5,916	5,988	6,060
90	6,133	6,205	6,278	6,350	6,423	6,496	6,569	6,642	6,715	6,788
100	6,861	6,935	7.008	7,082	7,155	7,229	7,303	7,377	7,451	7,525
110	7,599	7,673	7,747	7,821	7,896	7,970	8,045	8,119	8,194	8,269
120	8,344	8,419	8,494	8,569	8,644	8,719	8,794	8,870	8,945	9,021
130	9,097	9,172	9,248	9,324	9,400	9,476	9,552	9,628	9,704	9,780
140	9,857	9,933	10,010	10,086	10,163	10,240	10,316	10,393	10,470	10,547
150	10,624	10,701	10,779	10,856	10,933	11,011	11,088	11,166	11,243	11,321
160	11,399	11,476	11,554	11,632	11,710	11,788	11,866	11,945	12,023	12,101
170	12,180	12,258	12,337	12,415	12,494	12,573	12,651	12,730	12,809	12,888
180	12,967	13,046	13,126	13,205	13,284	13,363	13,443	13,522	'13,602	13,681
190	13,761	13,841	13,921	14,000	14,080	14,160	14,240	14,320	14,400	14,481
200	14,561	14,641	14,722	14,802	14,882	14,963	15,044	15,124	15,205	15,286
210	15,366	15,447	15,528	15,609	15,690	15,771	15,853	15,934	16,015	16,096
220	16,178	16,259	16,341	16,422	16,504	16,585	16,667	16,749	16,831	16,912
230	16,994	17,076	17,158	17,240	17,322	17,404	17,487	17,569	17,651	17,734
240	17,816	17,898	17,981	18,063	18,146	18,229	18,311	18,394	18,477	18,560
250	18,643	18,726	18,809	18,892	18,975	19,058	19,141	19,224	19,307	19,391
260	19,474	19,557	19,641	19,724	19,808	19,891	19,975	20,059	20,142	20,226
270	20,310	20,394	20,478	20,562	20,646	20,730	20,814	20,898	20,982	21,066
280	21,150	21,234	21,319	21,403	21,487	21,572	21,656	21,741	21,825	21,910
290	21,995	22,079	22,164	22,249	22,333	22,418	22,503	22,588	22,673	22,758
300	22,843	22,928	23,013	23,098	23,183	23,268	23,353	23,439	23,524	23,609
310	23,695	23,780	23,865	23,951	24,036	24,122	24,207	24,293	24,379	24,464
320	24,550	24,636	24,721	24,807	24,893	24,979	25,065	25,151	25,237	25,322
330	25,408	25,495	25,581	25,667	25,753	25,839	25,925	26,011	26,098	26,184
340	26,270	26,356	26,443	26,529	26,616	26,702	26,788	26,875	26,961	27,048
350	27,135	27,221	27,308	27,394	27,481	27,568	27,654	27,741	27,828	27,915
360	28,002	28,088	28,175	28,262	28,349	28,436	28,523	28,610	28,697	28,784
370	28,871	28,958	29,045	29,132	29,219	29,306	29,394	29,481	29,568	29,655
380	29,743	29,830	29,917	30,004	30,092	30,179	30,266	30,354	30,441	30,529

Продовження Таблиці Д2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
390	30,616	30,704	30,791	30,879	30,966	31,054	31,141	31,229	31,316	31,404
400	31,491	31,579	31,667	31,754	31,842	31,930	32,017	32,105	32,193	32,281
410	32,368	32,456	32,544	32,632	32,719	32,807	32,895	32,983	33,071	33,159
420	33,247	33,334	33,422	33,510	33,598	33,686	33,774	33,862	33,950	34,038
430	34,126	34,214	34,302	34,390	34,478	34,566	34,654	34,742	34,830	34,918
440	35,006	35,095	35,183	35,271	35,359	35,447	35,535	35,623	35,711	35,799
450	35,888	35,976	36,064	36,152	36,240	36,329	36,417	36,505	36,593	36,681
460	36,770	36,858	36,946	37,034	37,122	37,211	37,299	37,387	37,475	37,564
470	37,652	37,740	23,828	37,917	38,005	38,093	38,181	38,270	38,358	38,446
480	38,534	38,623	38,711	38,799	38,888	38,976	39,064	39,152	39,241	39,329
490	39,417	39,506	39,594	39,682	39,770	39,859	39,947	40,035	40,124	40,212
500	40,300	40,388	40,477	40,565	40,653	40,741	40,830	40,918	41,006	41,095
510	41,183	41,271	41,359	41,448	41,536	41,624	41,712	41,801	41,889	41,977
520	42,065	42,154	42,242	42,330	42,418	42,506	42,595	42,683	42,771	42,859
530	42,947	43,036	43,124	43,212	43,300	43,388	43,477	43,565	43,653	43,741
540	43,829	43,917	44,006	44,094	44,182	44,270	44,358	44,446	44,534	44,622
550	44,710	44,799	44,887	44,975	45,063	45,151	45,239	45,327	45,415	45,503
560	45,591	45,679	45,767	45,855	45,943	46,031	46,119	46,207	46,295	46,383
570	46,471	46,559	46,647	46,735	46,823	46,911	46,999	47,087	47,175	47,263
580	47,351	47,438	47,526	47,614	47,702	47,790	47,878	47,966	48,054	48,141
590	48,229	48,317	48,405	48,493	48,580	48,668	48,756	48,844	48,932	49,019
600	49,107	49,195	49,283	49,370	49,458	49,546	49,634	49,721	49,809	49,897
610	49,984	50,072	50,160	50,247	50,335	50,423	50,510	50,598	50,685	50,773
620	50,861	50,948	51,036	51,123	51,211	51,298	51,386	51,474	51,561	51,649
630	51,736	51,824	51,911	51,999	52,086	52,174	52,261	52,349	52,436	52,523
640	52,611	52,698	52,786	52,873	52,960	53,048	53,135	53,223	53,310	53,397
650	53,485	53,572	53,659	53,747	53,834	53,921	54,009	54,096	54,183	54,271
660	54,358	54,445	54,532	54,620	54,707	54,794	54,881	54,968	55,056	55,143
670	55,230	55,317	55,404	55,491	55,579	55,666	55,753	55,840	55,927	56,014
680	56,101	56,188	56,275	56,363	56,450	56,537	56,624	56,711	56,798	56,885
690	56,972	57,059	57,146	57,233	57,320	57,407	57,493	57,580	57,667	57,754
700	57,841	57,928	58,015	58,102	58,189	58,275	58,362	58,449	58,536	58,623
710	58,709	58,796	58,883	58,970	59,056	59,143	59,230	59,317	59,403	59,490
720	59,577	59,663	59,750	59,836	59,923	60,010	60,096	60,183	60,269	60,356
730	60,442	60,529	60,615	60,702	60,788	60,875	60,961	61,048	61,134	61,220
740	61,307	61,393	61,479	61,566	61,652	61,738	61,824	61,911	61,997	62,083
750	62,169	62,255	62,341	62,428	62,514	62,600	62,686	62,772	62,858	62,944
760	63,030	63,116	63,201	63,287	63,373	63,459	63,545	63,631	63,716	63,802
770	63,888	63,973	64,059	64,144	64,230	64,316	64,401	64,487	64,572	64,657
780	64,743	64,828	64,913	64,999	65,084	65,169	65,254	65,339	65,424	65,509

790	65,594	65,679	65,764	65,849	65,934	66,019	66, 03	66,188	66,273	66,357
800	66,442	66,527	66,611	66,695	66,780	66,864	66,948	67,033	67,117	67,201

ДОДАТОК 3

ТИПИ І ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДОВЖУВАЛЬНИХ І КОМПЕНСАЦІЙНИХ ПРОВОДІВ

3.1. Основні визначення та позначення

Термоелектричний перетворювач – термоперетворювач, який містить термопару і дія якого ґрунтується на використанні залежності термо-ЕРС термопари від температури.

Термопара – два провідники з різних матеріалів, які з'єднані на одному кінці й утворюють частину пристрою, що використовує для вимірювання температури термоелектричний ефект.

Термоелектричний ефект – генерування термо-ЕРС, яка виникає внаслідок різниці температур між двома з'єднаннями різних металів або сплавів, які утворюють частину одного й того ж контуру (кола).

Подовжувальні проводи – проводи, виготовлені з матеріалів такого самого складу, що й термоелектроди відповідних ТП. Подовжувальні проводи позначають літерою *«X»*, яку проставляють після позначення ТП, наприклад, «*JX*».

Компенсаційні проводи – проводи, виготовлені з матеріалів відмінного від термоелектродів відповідного ТП складу. Компенсаційні проводи позначають літерою «С», яку проставляють після позначення ТП, наприклад, *«КС»*.

Для одного типу ТП може бути використано компенсаційні проводи з різних сплавів, які відрізняють за допомогою додаткових літер *А* чи *В*. Ці додаткові літери *А* чи *В* проставляють після позначення самого компенсаційного проводу, наприклад, *«КСА», «КСВ»*.

Допуск подовжувального чи компенсаційного проводу – максимальне додаткове відхилення в мікровольтах (мкВ) від НСХ перетворення, зумовлене введенням подовжувального чи компенсаційного проводу у вимірювальне коло.

3.2. Допуски для подовжувальних та компенсаційних проводів

Допуски для подовжувальних та компенсаційних проводів у діапазоні температур компенсації мають відповідати наведеним у табл. Д3.1.

Таблиця Д3.1.

Основні характеристики подовжувальних і компенсаційних проводів

Тип проводу	Допуск до класу, мкВ (°С)		Температурний діапазон застосування проводу, °С	Максимальна температура вимірювального спаю, °С
	1	2		
JX	±85 (±1,5)	±140 (±2,5)	-25...200	500
TX	±30 (±0,5)	±60 (±1,0)	-25...100	300
MX	-	±60 (±1,0)	-25... 100	100
EX	±120 (±1,5)	±200 (±2,5)	-25... 200	500
KX	±60 (±1,5)	±100 (±2,5)	-25...200	900
LX	-	±100 (±2,5)	-25...200	500
NX	±60 (±1,5)	±100 (+2,5)	-25...200	900
IX	±60 (±1,5)	±100 (±2,5)	-25...200	700
KCA	-	±100 (±2,5)	0...150	900
KCB	-	±100 (±2,5)	0...100	900
IC	-	±100 (±2,5)	0...100	700
LC	-	±100 (±2,5)	0...100	500
NC	-	±100 (±2,5)	0...150	900
RCA	-	±30 (±2,5)	0...100	1000
RCB	-	±60 (±5,0)	0...200	1000
SCA	-	±30 (±2,5)	0...100	1000
SCB	-	±60 (±5,0)	0...200	1000
AC	-	±60 (±5,0)	0...100	1000

Примітки. 1. У дужках подано еквівалентні допуски в градусах Цельсія. Оскільки залежність термо-ЕРС від температури нелінійна, то допуск у градусах Цельсія залежить від температури вимірюваного спаю ТП.

2. Діапазон температур проводу може бути зменшено відносно значень, наведених у табл. Д3.1, через температурні обмеження, які визначаються властивостями ізоляції.

3. Для ТП типу *B* (типи ТП наведено в ДСТУ 2837-94) може бути використано провід із двох мідних провідників. Очікуване додаткове максимальне відхилення за температурного діапазону роботи подовжувального чи компенсаційного проводу 0...+100 °С становить

40 мкВ. Для максимальної температури вимірювального спаю +1400 °С температурний еквівалент становить +3,5 °С.

3.3 Система ідентифікації за кольором

1. Колір ізоляції *негативного* провідника для всіх типів ТП має бути БІЛИМ.
2. Колір ізоляції *позитивного* провідника має відповідати наведеному в табл. Д3.2.
3. За її наявності *зовнішня* ізоляція повинна мати колір, який відповідає наведеному в табл. Д3.2, крім ТП для внутрішніх безпечних кіл, де колір зовнішньої ізоляції для всіх типів ТП має бути ГОЛУБИМ.

Таблиця Д3.2.

Колір ізоляції позитивних провідників

Тип ТП	Колір ізоляції позитивного провідника і зовнішньої ізоляції
Мідь-константанові (мідь-мідьнікелеві*) ТМКн(*Т*) Хромель-константанові (нікельхром-мідьнікелеві*) ТХКн(*Е*)	Коричневий Фіолетовий
Залізоконстантанові (залізо-мідьнікелеві*) ТЗК(*J*) Хромель-алюмелеві (нікельхром-нікельалюмінієві*) ТХА(*К*)	Чорний Зелений
Платинородій-платинові ТПП 13 (*R*) і ТПП10 (*S*)	Оранжевий
Мідь-копелеві ТМК(*М*)	Червоний
Хромель-копелеві ТХК(*L*)	Рожевий
Сильх-силінові ТСС(*I*)	Жовтий
Вольфрамреній-вольфрамренієві ТВР *(А*-1, *А*-2*, А*-3)	Синій

*Назви типів ТП установлено міжнародними стандартами.

ДОДАТОК 4
ХАРАКТЕРИСТИКИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

4.1. Найменування та позначення фізичних величин

Найменування фізичних величин повинні відповідати науково-технічним термінам, які встановлені державними стандартами на терміни і визначення , а також рекомендаціям міжнародної організації зі стандартизації (ISO).

Важливе значення для практичного застосування фізичних величин мають їх умовні літерні позначення. Бажано, щоб кожна фізична величина мала окреме літерне позначення. Але велика кількість фізичних величин призводить до того, що нерідко одні і ті ж позначення (літери) застосовуються для позначення різних фізичних величин. Проте в одному і тому ж тексті забороняється використовувати одні й ті ж літери для позначення різних величин, або різні літери для позначення тієї ж самої величини.

Як правило, для позначення фізичних величин застосовуються літери латинського і грецького алфавітів (табл. Д 4.1). Основні переваги цих літер полягають в тому, що вони суттєво відрізняються в тексті від літер українського алфавіту і поширені у більшості країн світу.

У позначеннях фізичних величин часто використовується індексація в одних і тих же літерних позначеннях.

Найменування і найбільш поширені позначення фізичних величин, що використовуються в різних галузях науки і техніки, наведені в табл. Д 4.2.

Таблиця Д 4.1

Латинський алфавіт

	Назва
A a	а
B b	бе
C c	це
D d	де
E e	е
F f	еф
G g	ге
H h	аш
I i	і
J j	йот
K k	ка
L l	ель
M m	ем
N n	ен
O o	о
P p	пе
Q q	ку
R r	ер
S s	ес
T t	те

Грецький алфавіт

Літера	Назва
A α	альфа
B β	бета
Γ γ	гама
Δ δ	дельта
E ε	епсілон
Z ζ	дзета
H η	ета
Θ θ	тета
I ι	йота
K κ	каппа
Λ λ	ламбда
M μ	мю
N ν	ню
Ξ ξ	ксі
O o	омікрон
Π π	пі
P ρ	ро
Σ σ	сігма
T τ	тау
Y υ	іпсілон

U u	у
V v	ве
W w	дубль-ве
X x	ікс
Y y	ігрек
Z z	зет

Φ φ	фі
Χ χ	хі
Ψ ψ	псі
Ω ω	омега

Таблиця Д 4.2

Позначення фізичних величин

Найменування величини	Позначення		Примітки
	основне	запасне	
1	2	3	4
Електрика, магнетизм			
Вектор Пойтінга	S	$П$	
Відношення кількості витків	n	α	
Довжина електромагнітної хвилі	λ		
Добротність	Q		
Енергія електромагнітна	W		
Ємність електрична	C		
Заряд електричний	Q		
Зсув фаз	φ		
Індуктивність взаємна	M	L_{mn}	
Індуктивність власна	L		
Індукція магнітна	B		
Кількість витків	N	w	
Коефіцієнт трансформації	n		
Коефіцієнт трансформації напруги	K_U		
Коефіцієнт трансформації струму	K_I		
Напруга електрична	U		
Напруженість електричного поля	E		
Напруженість магнітного поля	H		
Опір електричний	R	r	
Опір електричний питомий	ρ		
Опір електричний повний	Z		
Опір електричний реактивний	X	x	
Період коливань	T		
Потенціал електричний	V	φ	
Потік магнітний	$Ф$		
Потужність	P		
Потужність повна	S	P_S	
Потужність реактивна	Q	P_Q	
Провідність електрична активна	J		

Продовження Таблиці Д 4.2

1	2	3	4
Проникність діелектрична абсолютна	ε_α	ε	
Проникність магнітна абсолютна	μ_α	μ	
Різниця електричних потенціалів	V		
Сила електрорушійна	E		
Сила струму	I		
Частота коливань електричної чи магнітної величини	f	ν	
Частота коливань електричної чи магнітної величини, кутова	w	Ω	
Швидкість поширення електромагнітних хвиль	C		
Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі	C_o		
Кінематика			
Кут плаский	α, β, γ		
Кут тілесний	Ω	ω	
Довжина	l		
Ширина	b		
Висота, глибина	h		
Товщина	d, s		
Радіус	r		
Діаметр	d		
Довжина шляху	s		
Площа поверхні	A	S	
Об’єм	V		
Час	t		
Період, тривалість періоду	T		
Швидкість кутова	w	Ω	
Швидкість лінійна	v		
Прискорення лінійне	a		
Прискорення вільного падіння	g		
Динаміка			
Коефіцієнт корисної дії	η		
Маса	m		
Густина	ρ		
Сила	F, G	P	
Сила тяжіння (вага)	g	P, W	
Момент сили	M		
Тиск	P		
Робота	w	A	

Продовження Таблиці Д 4.2

1	2	3	4
Енергія	E, w		
Термодинаміка			
Абсолютна температура	Θ	T	
Температура (за Цельсієм)	Θ	t	
Кількість теплоти	Q		
Температурний коефіцієнт	α		
Теплопровідність	λ	k	
Теплоємність	C		
Питома теплоємність	c		
Випромінювання			
Енергія випромінювання	Q, W	Q_e, U	
Потужність випромінювання	Φ,P	Φ_e	
Інтенсивність випромінювання	I	I_e	
Опроміненість	E	E_e	
Світло			
Сила світла	I	I_V	
Світловий потік	Φ	Φ_V	
Світлова енергія	Q	Q_V	
Яскравість	L	L_V	
Світність	M	M_V	
Освітленість	E	E_V	

Таблиця Д4.3

Основні одиниці SI, їх найменування, розмірність, позначення міжнародне і українське

Найменування	Розмірність	Позначення	
		міжнародне	українське
Метр	L	m	м
Кілограм	M	kg	кг
Секунда	T	s	с
Ампер	I	A	А
Кельвін	Θ	K	К
Кандела	J	cd	кд
Моль	N	mol	моль

Примітки :

1. Одиниця “моль” введена в SI в 1971 р.

2. Крім температури Кельвіна, яка позначається літерою T, допускається застосовувати температуру Цельсія : $t = T\text{-}T_0$,

де t - температура Цельсія,

T_0 = 273,15К (за визначенням).

Температура Кельвіна виражається в кельвінах (позначення – К), температура Цельсія – в градусах Цельсія (позначення – ^{0}C).

За розміром градус Цельсія дорівнює кельвіну і тому різницю температур можна визначати як в градусах Цельсія, так і в кельвінах.

Таблиця Д4.4

Додаткові одиниці SI

Фізична величина		Одиниця фізичної величини		
Найменування	Розмірність	Найменування	Позначення	
			міжнародне	українське
Плаский кут	-	Радіан	rad	рад.
Тілесний кут	-	Стерадіан	sr	ср.

4.2. Похідні одиниці фізичних величин

Похідні одиниці утворюються із основних одиниць. Шістнадцятьом з них присвоєні спеціальні найменування в честь великих вчених. Найменування інших одиниць утворено з використанням найменувань основних і спеціальних одиниць.

Спеціальні найменування мають одиниці світлового потоку – люмен, і освітленості – люкс.

В табл. Д 4.5 приведені найменування і позначення похідних одиниць SI, які знайшли досить широке застосування в навчальних закладах зв'язкового профілю.

Таблиця Д4.5

Найменування і позначення похідних одиниць SI

Фізична величина		Одиниця фізичної величини		
Найменування	Розмірність	Найменування	Позначення	
			міжнародне	українське
1	2	3	4	5
Частота	T^{-1}	герц	Hz	Гц
Сила, вага	LMT^{-2}	ньютон	N	Н
Тиск, механічна напруга, модуль пружності	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Pa	Па
Енергія, робота, кількість теплоти	L^2MT^{-2}	джоуль	J	Дж
Потужність, потік енергії	L^2MT^{-3}	ват	W	Вт
Електричний заряд	TI	кулон	C	Кл

Електрична напруга, потенціал, різниця потенціалів, електрорушійна сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	V	В
Електрична ємність	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	F	Ф
Електричний опір	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ω	Ом
Електрична провідність	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сіменс		См
Потік магнітної індукції, магнітний потік	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Wb	Вб
Густина магнітного потоку, магнітна індукція	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	T	Тл
Індуктивність, взаємна індуктивність	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генрі	H	Гн
Світловий потік	J	люмен	lm	лм
Освітленість	$L^{-2}J$	люкс	lx	лк
Активність радіонукліда	T^{-1}	бекерель	Ba	бк
Поглинута доза випромінювання	L^2T^{-2}	грей	Gy	Гр
Еквівалентна доза випромінювання	L^2T^{-2}	зіверт	Sv	Зв
Площа	L^2	квадратний метр	m^2	$м^2$
Об’єм, місткість	L^3	кубічний метр	m^3	$м^3$
Швидкість	LT^{-1}	метр за секунду	m/s	м/с
Кутова швидкість	T^{-1}	радіан за секунду	rad/s	рад/с

Прискорення	LT^{-2}	метр за секунду в квадраті	m/s^2	$м/с^2$
Напруженість магнітного поля	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/m	А/м
Напруженість електричного Поля	$LMT^{-3}I^{-1}$	вольт на метр	V/m	В/м

В табл. Д4.6 приведені позасистемні одиниці, що допускаються до застосування нарівні з одиницями SI, а також ті, що тимчасово допускаються до використання.

Таблиця Д4.6

Позасистемні одиниці

Фізична величина	Одиниця фізичної величини			
Найменування	Найменування	Позначення		Співвідношення з одиницею SI
		міжнародне	українське	
Маса	тонна	t	Т	10^3 кг
Час	хвилина	min	хв	60 с
	година	h	год	3600 с
	доба	d	доба	86400 с
Плаский кут	градус	…^{0}	…^{0}	(π/180) рад
	мінута	…′	…′	(π/10800) рад
	секунда	…″	…″	(π/648000) рад
Об'єм,місткість	літр	l	л	10^{-3} $м^3$
Площа	гектар	ha	га	10^4 $м^2$
Довжина*	морська миля	mile	миля	1852 м
Маса*	карат	carat	кар	$2·10^{-4}$ кг
	центнер	q	ц	10^2 кг
Швидкість*	вузол	kn	вуз	0,514 (4) м/с
Тиск	бар	bar	бар	10^5 Pa
Енергія	електрон-вольт	eV	еВ	$1,6·10^{-19}$ j
Повна потужність	вольт-ампер	VA	ВА	
Реактивна потужність	вар	var	вар	

4.3. Кратні та часткові одиниці фізичних величин

На практиці дуже часто зручно застосовувати десяткові кратні і часткові одиниці, які утворюються за допомогою множників 10^n, де n – ціле додатне або від'ємне число.

Кратними називають одиниці, які в ціле число разів більші за одиниці, від яких вони утворюються, частковими - одиниці, які в ціле число разів менші за одиниці, від яких вони утворюються.

Множники та приставки для утворення найменувань десяткових кратних і часткових одиниць наведено в табл. Д4.7

Таблиця Д4.7

Множники та приставки для утворення найменувань десяткових кратних і часткових одиниць

Множник	Приставка	Позначення	
		міжнародне	українське
10^{18}	екса	E	Е
10^{15}	пета	P	П
10^{12}	тера	T	Т
10^{9}	гіга	G	Г
10^{6}	мега	M	М
10^{3}	кіло	k	к
10^{2}	гекто	h	г
10^{1}	дека	da	да
10^{-1}	деци	d	д
10^{-2}	санти	c	с
10^{-3}	мілі	m	м
10^{-6}	мікро	μ	мк
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	піко	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф
10^{-18}	атто	a	а

В табл. Д4.8 наведені найменування, позначення та співвідношення деяких позасистемних одиниць, які поступово вилучаються з обігу відповідно до офіційних заходів кожної країни щодо переходу до застосування SI.

Таблиця Д4.8

Найменування, позначення та співвідношення деяких позасистемних одиниць

Фізична величина	Одиниця фізичної величини			
Найменування	Найменування	Позначення		Співвідношення з одиницею SI
		міжнародне	українське	
Довжина	ангстрем	A	А	10^{-10} м
	мікрон	μ	мк	10^{-6} м
Площа	ар	a	а	100 $м^2$
Маса	центнер	q	ц	100 кг
Сила	дина	dyn	дин	10^{-5} Н
Робота	ерг	erg	ерг	10^{-7} Дж
Потужність	кінська сила		к. с.	735,499 Вт
Кількість теплоти	калорія	cal	кал	4,1868 Дж
Поглинута доза випромінювання	рад	rad	рад	0,01 Гр
Еквівалентна доза випромінювання	бер	rem	бер	0,01 Зв
Активність нукліда у радіоактивному джерелі	кюрі	Ci	Кі	$3{,}7 \cdot 10^{10}$ Бк

ЗМІСТ

Список прийнятих скорочень і позначень.....3

ВСТУП.....4

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАННЯ, ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ.....7

1.1. Основні відомості про вимірювання.....7

1.1.1. Фізичні величини. Одиниці величин 7

1.1.2. Види та методи вимірювань.....11

1.1.3. Поняття про шкали.....15

1.1.4. Похибки вимірювань і похибки засобів вимірювання 18

1.1.5. Місце вимірювань в системах керування 22

1.2. Засоби вимірювальної техніки.....23

1.2.1. Структурні схеми та загальні структурні елементи засобів вимірювальної техніки 26

1.2.2. Статичні та динамічні характеристики засобів вимірювальної техніки.....31

1.2.3. Похибки засобів вимірювальної техніки 36

1.2.4. Нормування метрологічних характеристик і класи точності засобів вимірювальної техніки.....44

1.2.5. Засоби вимірювальної техніки в рамках Державної системи приладів і засобів автоматизації.....48

1.3. Основні відомості про системи автоматичного контролю.....58

1.3.1. Класифікація систем автоматичного контролю 59

1.3.2. Структурні схеми систем автоматичного контролю 60

1.3.3. Датчик в системах автоматичного контролю та керування 64

1.4. Загальна класифікація первинних вимірювальних перетворювачів автоматичних систем.....65

1.4.1. Уніфікація і стандартизація вимірювальних перетворювачів 68

1.4.2. Фізичні основи побудови первинних вимірювальних перетворювачів *70*

1.4.3. Обґрунтування вибору вимірювального перетворювача 78

1.4.4. Перспективи розвитку сенсорної техніки 81

2. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СИГНАЛІВ І СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ 85

2.1. Загальні відомості 86

2.2. Електричні параметричні перетворювачі 86

2.2.1. Потенціометричні перетворювачі 88

2.2.2. Тензорезисторні первинні вимірювальні перетворювачі 96

2.2.3. Терморезистивні перетворювачі 110

2.2.4. Фоторезисторні вимірювальні перетворювачі 124

2.3. Електромагнітні перетворювачі 128

2.3.1. Типи електромагнітних перетворювачів 129

2.3.2. Індуктивні перетворювачі 130

2.3.3. Взаємоіндуктивні (трансформаторні) перетворювачі 137

2.3.4. Магнітопружні індукційні перетворювачі 138

2.4. Магнітомодуляційні перетворювачі 141

2.5. Електростатичні вимірювальні перетворювачі 144

2.5.1. Ємнісні вимірювальні перетворювачі 145

2.5.2. Діелькометричні вимірювальні перетворювачі 147

2.6. Сельсинні перетворювачі 149

2.7. Тахогенератори 160

2.7.1. Тахогенератори постійного струму 163

2.7.2. Тахогенератори змінного струму 167

2.7.3. Синхронні тахогенератори 169

2.8. Імпульсні перетворювачі 170

2.9. П'єзоелектричні перетворювачі 172

2.10. Гальваномагнітні перетворювачі 176

2.11. Первинні вимірювальні перетворювачі вологості 178

2.11.1. Загальні відомості 178

2.11.2. Кондуктометричні первинні вимірювальні перетворювачі вологості 180

2.11.3. Діелькометричні первинні вимірювальні перетворювачі вологості 182

2.11.4. Гігрометричні первинні вимірювальні перетворювачі вологості 183

2.12. Електросилові перетворювачі 185

2.13. Пневмосилові перетворювачі 186

2.13.1. Перетворювач «лінійне переміщення - пневмосигнал» 187
2.13.2. Перетворювач «кутове переміщення - пневмосигнал» 188
2.14. Перехідні (узгоджувальні) перетворювачі 190
2.14.1. Електропневматичні і пневмоелектричні перетворювачі 190
2.14.2. Аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі 192
2.15. Системи дистанційного передавання вимірювальної інформації 197
2.15.1. Системи дистанційного передавання вимірювальної інформації на базі реостатних перетворювачів 197
2.15.2. Системи дистанційного передавання вимірювальної інформації на базі диференціально-трансформаторних перетворювачів 198
2.15.3. Системи дистанційного передавання вимірювальної інформації на базі феродинамічних перетворювачів 200
2.15.4. Система дистанційної передачі вимірювальної інформації на базі частотного електричного перетворювача 201
3. ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ 206
3.1. Загальні відомості 206
3.2. Деформаційні вимірювачі тиску 208
3.3. Поршневі вимірювачі тиску 212
3.4. Електричні вимірювачі тиску 215
3.4.1. Індуктивні вимірювачі тиску 215
3.4.2. Диференціально-трансформаторні вимірювачі тиску 216
3.4.3. Ємнісні вимірювачі тиску 217
3.4.4. Вимірювальні тензоперетворювачі тиску типу «Сафір» 218
3.4.5. Струнні вимірювачі тиску 220
3.4.6. П'єзоелектричні вимірювачі тиску 220
3.4.7. Манометри опору 222
3.5. Диференціальні манометри 222
3.5.1. Рідинні дифманометри 223
3.5.2. Рідинно-механічні дифманометри 225
3.5.3. Деформаційні дифманометри 227
Дифманометри типу ДМ 228
Дифманометри типу ДМЕР і ДСЕР 229
Дифманометри типу «Сафір» 232

Пневматичний перетворювач різниці тисків 13ДД11.....233
3.6. Пневматичні вторинні прилади.....234
Показувальні прилади.....234
Реєструвальні прилади.....235
4. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....238
4.1. Фізичні основи вимірювання температури. Температурні шкали. Промислові вимірювачі температури.....238
4.2. Термометри розширення.....243
4.2.1. Рідинні та механічні термометри.....243
4.2.2. Електроконтактні технічні термометри.....250
4.3. Манометричні термометри.....253
4.3.1. Газові манометричні термометри.....254
4.3.2. Рідинні манометричні термометри.....254
4.3.3. Конденсаційні манометричні термометри.....255
4.4. Засоби вимірювання, що працюють у комплекті з термоперетворювачами опору.....259
4.4.1. Зрівноважені мости.....260
4.4.2. Автоматичні мости.....263
4.4.3. Незрівноважені мости.....264
4.4.4. Логометри.....266
4.5. Термоелектричні перетворювачі.....269
4.5.1. Загальні відомості.....269
4.5.2. Увімкнення вимірювального приладу в коло термоелектричного перетворювача.....272
4.5.3. Способи з'єднання термоелектричних перетворювачів.....273
4.5.4. Градуювання термоелектричних перетворювачів за допомогою нормального термоелектрода.....274
4.5.5. Поправка на температуру вільних кінців термоелектричних перетворювачів.....275
4.5.6. Подовжувальні та компенсаційні проводи.....276
4.5.7. Автоматична компенсація зміни термо-ЕРС, спричиненої відхиленням температури вільних кінців термоелектричних перетворювачів від температури градуювання.....277
4.5.8. Конструкція та статичні характеристики термоелектричних перетворювачів.....278

4.6. Прилади для вимірювання термо-ЕРС 282
4.6.1. Потенціометри 282
4.6.2. Мілівольтметри 287
4.7. Нормувальні перетворювачі 290
4.8. Термоперетворювачі з уніфікованими вихідними сигналами 296
4.9. Особливості вимірювання температури контактними методами 297
4.10. Кварцові термометри 300
4.11. Вимірювання температури за допомогою напівпровідникових терморезисторів, діодів і транзисторів 302
4.12. Пірометри випромінювання 307
Радіаційні пірометри (пірометри повного випромінювання) 308
Колірні пірометри 310
Квазімонохроматичні пірометри 313
5. ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ 317
5.1. Загальні відомості. Візуальні засоби вимірювання рівня 317
5.2. Поплавкові рівнеміри 318
5.3. Буйкові рівнеміри 320
5.4. Гідростатичні рівнеміри 323
5.5. Електричні рівнеміри 325
5.6. Фотоелектричні рівнеміри 329
5.7. Радарні рівнеміри 329
5.8. Ультразвукові (акустичні) рівнеміри 330
5.9. Вагові рівнеміри 332
5.10. Вимірювання рівня сипучих і кускових матеріалів 333
6. ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТА ВИТРАТИ РЕЧОВИНИ 335
6.1. Загальні відомості 335
6.2. Значення засобів вимірювання витрати речовини та загальні вимоги до них 336
6.3. Витратоміри змінного перепаду тиску 338
6.4. Витратоміри постійного перепаду тиску 346
6.4.1. Ротаметри 346
6.4.2. Поплавкові витратоміри 348
6.5. Тахометричні витратоміри 349
6.5.1. Камерні лічильники 349

6.5.2. Турбінні (швидкісні) лічильники 354
6.5.3. Кулькові витратоміри 356
6.6. Електромагнітні (індукційні) витратоміри 357
6.7. Вихрові витратоміри 360
6.8. Кореляційні витратоміри 363
6.9. Вимірювання витрати та кількості сипких та жидких речовин 367
7. ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ 375
7.1. Загальні відомості 375
7.2. Вимірювання вологості газів 375
7.3. Вимірювання вологості твердих і сипких матеріалів 380
8. ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ТВЕРДИХ ТІЛ 385
8.1. Загальні відомості 385
8.2. Вимірювання лінійних та кутових переміщень з використанням реостатних перетворювачів 385
8.3. Вимірювання лінійних та кутових переміщень з використанням індуктивних перетворювачів 388
8.4. Вимірювання переміщень з використанням трансформаторних перетворювачів 390
8.5. Вимірювання переміщень з використанням ємнісних перетворювачів 395
8.6. Магнітострикційні перетворювачі переміщень 398
Магнітострикційні перетворювачі переміщення в часовий інтервал 402
Магнітострикційні перетворювачі переміщення в частоту імпульсів 407
Магнітострикційні перетворювачі переміщень у цифровий код 408
Магнітострикційний перетворювач переміщення і швидкості переміщення в цифровий код 413
8.7. Вимірювання параметрів обертового руху 418
8.8. Вимірювання деформації поверхні досліджуваного об'єкта 421
8.9. Вимірювання механічних сил 423
9. ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОЇ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ 428
9.1. Застосування мікропроцесорних вимірювальних приладів 428
9.2. Автоматичні цифрові вимірювальні прилади 429

9.2.1. Загальні відомості....429
9.2.2. Прилади подвійного інтегрування....433
9.2.3. Цифрові вольтметри....436
9.2.4. Цифрові програмовані багатоканальні вимірювальні прилади (реєстратори даних)....437
9.3. Застосування цифрової обчислювальної техніки у засобах для технологічних вимірювань....438
9.3.1. Уведення вимірювальної інформації про технологічні параметри в пристрої цифрової обчислювальної техніки....439
9.3.2. Застосування засобів цифрової обчислювальної техніки у приладах для технологічних вимірювань....441
9.3.3. Застосування засобів цифрової обчислювальної техніки у вимірювальних системах....444
10.СУЧАСНІ ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ....451
10.1. Загальні відомості....451
10.2. Перетворювачі температури....452
10.3. Первинні перетворювачі вологості....478
10.3.1. Перетворювачі вологості повітря....480
10.3.2. Перетворювачі вологості грунту....495
11.ЛАБОРАТОРНІ ЗАНЯТТЯ З ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ....509
11.1. Дослідження характеристик датчика освітленості та аналіз роботи приладу контролю полум`я....509
11.2. Вивчення та аналіз роботи датчика частоти обертання приводного вала системи автоматичного контролю завантаження приводного вала....512
11.3. Дослідження характеристик сельсинної системи дистанційної передачі кута....516
11.4. Дослідження роботи позиційного регулятора температури повітря ЦР8001/2 у складі системи стабілізації температури повітря в термостаті....520
11.5. Дослідження характеристик магнітного підсилювача....524
11.6. Дослідження роботи датчика контролю висіву та датчика рівня у складі універсальної системи контролю за висівом УСК....528
11.7. Вивчення і аналіз роботи логічних елементів автоматики....533
11.8. Вивчення реле часу та аналіз їх роботи....541

12.ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ З ВИВЧЕННЯ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ 547

12.1. Вивчення статичних та динамічних характеристик первинних вимірювальних перетворювачів температури 547

12.2. Логічні елементи 568

12.3. Структурні функціональні схеми та загальні функціональні елементи вимірювальних перетворювачів 583

ЛІТЕРАТУРА 601

ДОДАТКИ 604

ДОДАТОК 1. ТИПИ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОПОРУ 604

1.1. Умовні позначення номінальних статичних характеристик термоперетворювачів опору 604

1.2. Основні характеристики термоперетворювачів опору 605

1.3. Допустиме відхилення опору термоперетворювачів опору 605

1.4. Відношення опору термоперетворювачів опору для 100°C (R_{100}) до опору для 0°C (R_0) 606

1.5. Номінальні статичні характеристики термоперетворювачів опору 606

1.6. Інтерполяційні залежності $W_t(t)$ для термоперетворювачів опору 615

1.7. Визначення чутливості термоперетворювачів опору 616

ДОДАТОК 2. ТИПИ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ 617

2.1. Типи термоелектричних перетворювачів 617

2.2. Номінальні статичні характеристики перетворення термопар термоелектричних перетворювачів 618

ДОДАТОК 3. ТИПИ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДОВЖУВАЛЬНИХ І КОМПЕНСАЦІЙНИХ ПРОВОДІВ 630

3.1. Основні визначення та позначення 630

3.2. Допуски для подовжувальних та компенсаційних проводів 630

3.3. Система ідентифікації за кольором 632

ДОДАТОК 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН 633

4.1. Найменування та позначення фізичних величин 633

4.2. Похідні одиниці фізичних величин 637

4.3. Кратні та часткові одиниці фізичних величин 640

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Лукінюк Михайло Васильович
Лукін Володимир Євгенович
Шворов Сергій Андрійович
Гладкий Анатолій Михайлович
Гунченко Юрій Олександрович
Ємельянов Павло Сергійович

КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Навчальний посібник

Комп'ютерна верстка та правка - авторська

Відповідальний за випуск – О.Т.Ростунов

Підписано до друку 10.11.16. Формат 60х84/16.
Папір MultiCopy. Гарнітура Таймс. Друк циф. дублікатор.
Ум. друк. арк. 40.56.
Тираж 300. Зам. 12/16.
Видавництво–ФОПРостунов О.Т.,
«Видавництво "Науковий світ"»®.
Друк–друкарня ФОП Ростунова О.Т.
Свідоцтво ДК № 249 від 16.11.2000 р.
03680, м. Київ, вул. Боженка, 17, оф. 414.
тел. 200-87-15, 200-87-13, 050-525-88-77.