

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МЕТРОЛОГІЯ

Навчальний посібник

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою
«Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології»
спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології»*

Укладач: Н. М. Защепкіна

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

- Укладач: *Защепкіна Наталія Миколаївна*, д.т.н., проф., кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, ПБФ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
- Рецензенти: *Себко Вадим Вадимович*, д.т.н., проф. кафедри хімічної та промислової екології Національного технічного університету «Харківської політехнічний інститут»
- Шевчук Дмитро Олегович*, д.т.н., проф. завідувач кафедри організації авіаційних перевезень Київського національного авіаційного університету
- Ванкевич Петро Іванович*, д.т.н., провідний наук. спів. Національної академії Сухопутних військ імені Петра Сагайдачного
- Відповідальний редактор: *Здоренко Валерій Георгійович*, д.т.н., проф. кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, ПБФ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6/22 від 24.06.2022 р.) за поданням Вченої ради приладобудівного факультету (протокол № 5/22 від 30.05.2022 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Защепкіна Наталія Миколаївна, д.т.н., проф

МЕТРОЛОГІЯ

Навчальний посібник

Метрологія [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Н.М. Защепкіна. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 397 с.

Навчальний посібник призначено для здобувачів вищої освіти першого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології». В навчальному посібнику приділено увагу основним поняттям метрології та засобам вимірювання.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
I. РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ.....	8
Тема 1. Метрологія як наука. Загальні відомості.....	8
1.1. Короткий нарис історії розвитку метрології.....	9
1.2. Метрологія: суть, предмет, об'єкт та правові основи.....	12
1.3. Основні терміни метрології.....	13
1.4. Державна метрологічна система України.....	15
1.5. Міжнародні метрологічні організації.....	20
Запитання для самоконтролю до теми 1.....	23
Тема 2. Фізичні величини.....	24
2.1. Класифікація фізичних величин.....	24
2.2. Системи одиниць фізичних величин.....	29
2.3. Одиниці фізичних величин міжнародної системи SI.....	35
Запитання для самоконтролю до теми 2.....	41
Тема 3. Технічні вимірювання.....	42
3.1. Основні поняття про вимірювання. Забезпечення єдності вимірів.....	42
3.2. Види вимірювань.....	58
3.3. Методи вимірювань.....	67
3.4. Класифікація засобів вимірювальної техніки.....	70
3.5. Метрологічні показники засобів вимірювання.....	72
3.6. Калібрування засобів вимірювальної техніки.....	73
3.7. Еталон як засіб вимірювання.....	74
3.8. Перспективи розвитку еталонів.....	90
Запитання для самоконтролю до теми 3.....	91
Тема 4. Похибки вимірювань.....	92
4.1. Види похибок та причини їх виникнення.....	92
4.2. Класифікація похибок вимірювання.....	101
4.3. Оцінка результатів прямих вимірювань.....	105
4.4. Повірка засобів вимірювань.....	110
Запитання для самоконтролю до теми 4.....	118
Тема 5. Технічні засоби для вимірювання лінійних та кутових розмірів.....	119
5.1. Плоскопаралельні кінцеві міри довжини.....	119
5.2. Штангенінструменти. Будова і правила користування.....	120
5.3. Мікрометричні інструменти. Будова і правила користування.....	125
5.4. Калібри. Характеристика засобу вимірювань та особливості застосування.....	129
5.5. Індикатори годинникового типу.....	131
5.6. Засоби вимірювання кутів та конусів.....	136
Запитання для самоконтролю до теми 5.....	140
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРИЛАДИ.....	141

Тема 6. Вимірювальні сигнали, перетворення вимірювальних сигналів, форми вимірювальної інформації.....	141
6.1. Вимірювальні сигнали та їх характеристика.....	141
6.2. Процедура вимірювання та вимірювальні операції.....	142
6.3. Засоби вимірювальної техніки.....	143
6.4. Різновиди вимірювань.....	154
6.5. Різновиди методів прямих вимірювань.....	162
Запитання для самоконтролю до теми 6.....	168
Тема 7. Вимірювальні перетворювачі електричних величин.....	170
7.1. Загальні відомості.....	170
7.2. Перетворювачі роду вимірюваної величини.....	171
7.3. Модулятори та демодулятори.....	173
7.4. Подільники напруги.....	180
7.5. Вимірювальні трансформатори.....	184
7.6. Вимірювальні підсилювачі.....	189
Запитання для самоконтролю до теми 7.....	192
Тема 8. Електричні вимірювальні прилади та вимірювання.....	193
8.1. Загальні відомості.....	193
8.2. Електромеханічні вимірювальні перетворювачі струму та напруги.....	205
Запитання для самоконтролю до теми 8.....	230
Тема 9. Аналогові вимірювальні прилади.....	231
9.1. Класифікація АВП.....	231
9.2. Електромеханічні прилади.....	232
9.3. Основні метрологічні характеристики.....	235
Запитання для самоконтролю до теми 10.....	238
Тема 10. Цифрові вимірювальні прилади.....	239
10.1. Класифікація цифрових вимірювальних приладів.....	239
10.2. Принцип роботи.....	244
Запитання для самоконтролю до теми 10.....	250
Тема 11. Вимірювання неелектричних величин.....	251
11.1. Поняття про вимірювання неелектричних величин.....	251
11.2. Принцип роботи.....	251
Запитання для самоконтролю до теми 11.....	256
Тема 12. Вимірювання температури.....	258
12.1. Методи вимірювання температури і види температурних шкал.....	259
12.2. Класифікація приладів для вимірювання температури.....	261
12.3. Ртутні термометри.....	262
12.4. Дилатометричні термометри.....	264
12.5. Манометричні термометри.....	265
12.6. Термоелектричні термометри.....	266
12.7. Термометри опору.....	268
12.8. Пірометри.....	269

12.9. Тепловізори.....	273
12.9.1. Принцип дії тепловізорів.....	275
12.9.2. Області застосування тепловізорів.....	276
12.9.3. Методика роботи з тепловізором.....	277
Запитання для самоконтролю до теми 12.....	278
Тема 13. Вимірювання геометричних розмірів.....	279
13.1. Загальні поняття.....	279
13.2. Геометричні величини.....	290
13.3. Вимірювання лінійних розмірів.....	295
13.3.1. Шкальні засоби вимірювання.....	295
13.3.2. Пневматичні вимірювальні прилади.....	296
13.3.3. Індуктивні прилади.....	297
13.3.4. Оптико-механічні і оптичні прилади.....	300
13.3.5. Акустичні прилади.....	303
Запитання для самоконтролю до теми 13.....	305
Тема 14. Вимірювання тиску.....	306
14.1. Загальна класифікація.....	306
14.2. Рідинні засоби вимірювання тиску.....	309
14.3. Деформаційні прилади для вимірювання тиску.....	313
14.4. Установка і обслуговування деформаційних трубчато-пружинних манометрів.....	318
14.5. Засоби вимірювання теплоти згорання рідких і газоподібних палив.....	324
Запитання для самоконтролю до теми 14.....	326
Тема 15. Прилади для вимірювання кількості та витрати речовини.....	327
15.1. Загальні поняття.....	327
15.2. Прилади для вимірювання кількості речовин.....	347
15.3. Особливості використання приладів для вимірювання витрат маси речовин.....	348
Запитання для самоконтролю до теми 15.....	353
Тема 16. Вимірювання рівня рідин.....	354
16.1. Загальні відомості.....	354
16.2. Візуальні засоби вимірювання рівня.....	354
16.3. Поплавкові засоби вимірювання рівня.....	355
16.4. Буйкові засоби вимірювання рівня.....	357
16.5. Гідростатичні засоби вимірювання рівня.....	358
16.6. Електричні засоби вимірювання рівня.....	361
16.7. Акустичні засоби вимірювання рівня.....	363
16.8. Радіоізотопні рівнеміри.....	364
Запитання для самоконтролю до теми 16.....	365
Тема 17. Вимірювання хімічного складу і концентрації рідини.....	366
17.1. Наукові розробки в галузі вимірювань складу та властивостей газів і рідин.....	366

17. 2. Загальні поняття.....	368
17.3. Вимірювання фізико-хімічних параметрів рідин і газів.....	370
17.3.1. Загальні відомості.....	370
17.3.2. Засоби вимірювання густини рідин і газів.....	370
17.3.3. Засоби вимірювання в'язкості рідин.....	376
Запитання для самоконтролю до теми 17.....	380
Тема 18. Вимірювальні інформаційні системи.....	381
18.1. Загальні відомості.....	381
18.2. Класифікація ІВС.....	381
18.2.1. Особливості систем автоматичного контролю.....	382
18.2.2. Системи технічного діагностування.....	384
18.2.3. Системи розпізнавання образів.....	386
18.2.4. Загальна характеристика систем телевимірювань.....	393
18.2.5. Галузі використання інформаційно-вимірювальних систем.....	394
Запитання для самоконтролю до теми 18.....	395
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	396

ВСТУП

Метрологія є інструментом забезпечення якості продукції, робіт і послуг – важливого аспекту багатогранної наукової та комерційної діяльності. Проблема якості актуальна для всіх країн незалежно від зрілості їх ринкової економіки. Дотримання правил метрології в різних сферах діяльності людини, дозволяє звести до мінімуму матеріальні втрати від недостовірних результатів вимірювань.

Вимірювання – один з найдревніших видів діяльності людини. Необхідність різного роду вимірювань виникла тоді, коли людина почала свідомо займатися господарською діяльністю та обміном результатами праці. Перші терези були створені понад 6000 років тому, а годинник – ще раніше. Вага, час, лінійні розміри та площа – це перші вимірювані людиною величини. З розвитком держави, і особливо, з розвитком промисловості, виникли об'єктивні потреби у вимірюванні нових величин та підвищенні якості їх вимірювання.

Але вимірювання не тільки забезпечують повсякденну господарську діяльність людини. З часом вимірювання та засоби вимірювань перетворилися на потужний інструмент пізнання світу. Саме результати вимірювань дають експериментаторам об'єктивну інформацію про різні фізичні об'єкти та явища, дозволяють перевірити наукові гіпотези та зазирнути за грань непізнаного. І цю властивість вимірювань людство усвідомило давно.

Вимірювання як наука почала розвиватися наприкінці XIX ст. На сьогодні номенклатура вимірювань налічує сотні різних видів вимірювань. Для того, щоб розібратися у відомих методах вимірювань та засобах їх реалізації, потрібно їх класифікувати, узагальнити та визначити основні характеристики і критерії їх оцінки.

Отже основними завданнями метрології є:

- розвиток загальної теорії вимірювань;
- встановлення одиниць фізичних величин і узаконення певних одиниць вимірювань;
- розробка методик вимірювань та засобів вимірювальної техніки;
- забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань;
- встановлення еталонів одиниць вимірювань;
- проведення регулярної повірки мір та вимірювальних приладів, що знаходяться в експлуатації;
- випробування нових засобів вимірювання тощо.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

Тема 1. Метрологія як наука. Загальні відомості.

План

- 1.1. Короткий нарис історії розвитку метрології
- 1.2. Метрологія: суть, предмет, об'єкт та правові основи
- 1.3. Основні терміни метрології
- 1.4. Державна метрологічна система України
- 1.5. Міжнародні метрологічні організації

Спад виробництва та зниження економічного потенціалу України на початку 90-х років ХХ ст. негативно вплинули на якість і конкурентоспроможність вітчизняних товарів, робіт і послуг, впровадження сучасних методів управління якістю.

Ситуація ускладнювалась інтервенціями іноземних товарів, зниженням платоспроможності населення. Це пояснюється недоліками економічної політики, зокрема надмірною лібералізацією ринку, важелів у сфері управління якістю. До того ж, акти законодавства, що регулюють відносини в цій сфері, не узгоджені між собою і не спрямовані на забезпечення випуску конкурентоспроможної продукції, а діюча система державного регулювання не стимулює виробників до поліпшення її якості.

Не створено інфраструктури, яка сприяла б поліпшенню якості, підтримувала інновації, немає інформаційного забезпечення, практично не проводяться навчання у сфері управління якістю та довіклля.

У центр економічної політики на сучасному етапі поставлено завдання всебічного підвищення технічного рівня і якості продукції, яка повинна втілювати останні досягнення наукової думки, задовольняти найвищі техніко-економічні, естетичні та інші вимоги споживачів.

Підвищення якості вітчизняної продукції в умовах ринкової економіки є однією зі складових механізму прискорення соціально – економічного розвитку суспільства, вимагає посилення дієвості державних стандартів на її технічний рівень.

У сучасних умовах при виробництві суден, вузлів, агрегатів необхідна кооперація між великою кількістю підприємств різних галузей промисловості. Науково-технічний прогрес у науці та техніці значно посилив роль метрології як науки про вимірювання.

Це пояснюється тим, що без випереджуючого розвитку метрології неможливий прогрес багатьох напрямків науки й техніки і передусім розробка нових сучасних засобів вимірювання та їх практичне використання.

Одним із важливих завдань метрології як науки про вимірювання є забезпечення єдності вимірювання та достовірності їх результатів, оскільки останнім часом різко підвищилися вимоги до точності вимірювань, збільшилася кількість вимірюваних величин.

Значно зросли вимоги до вимірювань у суднобудівній про-мисловості, до контролю за показниками якості продукції.

Зростає роль міжнародної стандартизації, розширюються межі застосування стандартів ІСО. Спеціалізація виробництва робить необхідним проведення випереджувальних робіт зі стандартизації в галузі взаємозамінності деталей, агрегатів і вузлів плавальних засобів та застосування єдиної системи допусків і посадок. Взаємозамінність вимагає високого рівня вимірювальної техніки.

Ось чому, засвоєння широкого кола питань, що стосуються метрології, стандартизації, взаємозамінності та технічних вимірювань, становить основу підготовки сучасного інженерно-технічного працівника судової галузі.

1.1. Короткий нарис історії розвитку метрології

Історія розвитку метрології висвітлювалась у багатьох дослідженнях, зібрано численні відомості про становлення цієї науки. Вагомий внесок у розвиток метрології своїми працями здійснили такі вчені, як Г. І. Вільд, Б. С. Якобі, А. Я. Купфер, В. С. Глухов, Д. І. Менделєєв, Н. Г. Єгоров, Л. В. Залуцький, В. В. Бойцов та ін.

Вимірювання – одне з найбільш стародавніх занять у пізнавальній діяльності людини. Його виникнення відноситься до початку матеріальної культури людства.

Здавна людям досить часто доводилося мати справу з різними вимірюваннями: при будівництві споруд, при визначенні напрямку руху по морю з використанням астрономії, у торгівлі, при визначенні пропорцій людського тіла.

У стародавні часи частини людського тіла використовувалися для вимірювання довжини: ширина великого пальця – дюйм, ширина долоні – пальма, довжина стопи – фут, відстань від ліктя до кінця середнього пальця – лікоть та ін.

В Англії ще в XVII ст. було прийнято одиницю міри довжини – фут (нога, стопа), яка дорівнювала 30,5 см.

Різні народи нашої планети перебували на неоднакових стадіях розвитку, тому міри довжини в них були різноманітні. Досить пригадати, що у XVII ст. у Європі налічувалося понад 100 різних футів, понад 120 фунтів, 46 миль та інших одиниць виміру. У Київській Русі найпоширенішими мірами довжини були: верста, сажень, лікоть, аршин, ступня, долоня, вершок, палець; мірами ваги – пуд, гривня, гривенка, золотник тощо. [2].

У Московській державі з 1550 року було запроваджено «печатні мідні міри» (осьмини) для сипучих речовин, а з 1558 року, за часів Івана Грозного, було введено «государеві» (казенні) ваги. У законодавстві Петра I також згадуються укази про запровадження єдиних мір і ваги. Виконання цих указів покладалося на воевод. Одиницями виміру часу на Русі були рік, місяць, тиждень, доба, година. Причому відлік нового року починався і з 1 березня, і з 1 вересня. Указом Петра I введено початок нового року з першого січня.

Заснування у 1725 році Російської Академії сприяло розвитку наукової думки, вдосконаленню мір та упорядкуванню їх точності. Розширювалися межі впровадження одноманітних російських мір. У 1736 році за рішенням сенату була створена Комісія мір і ваги, яку очолив головний директор монетного двору граф М. Г. Головін.

Для організації повірочної роботи було утворено спеціальний комітет, який у 1747 році розробив еталонний російський фунт (409,5 г) і визначив за норму довжини аршин (0,7112м). Фунт і аршин у нашій державі використовувалися до впровадження метричної системи.

Указом від 1835 року «Про систему російських мір і ваги» було закладено основу російської системи вимірювання, а в Санкт-Петербурзькій фортеці в одному з особливих приміщень зберігалось нове зібрання еталонних мір довжини, місткості рідких і крихких тіл та вагових одиниць. За цими еталонами було виготовлено і розіслано в губернії Росії вивірені копії аршина, відра, четверика, фунта.

Практичним застосуванням російських мір і ваг займалося засноване у 1842 р. Депо еталонних мір та ваги. Організація Депо і встановлення правил повірки робочих мір стали тією основою, яка забезпечувала єдність вимірювання у Росії й одноманітність мір. Першим хранителем Депо еталонних мір і ваги було призначено академіка А. Я. Купфера, відомого вченого і метролога, який очолював Депо з 1842 до 1865 р.

Період 1892-1917 рр. називають Менделєєвським. Головна палата мір і ваги, управителем якої до останніх днів життя був Д. І. Менделєєв, стала однією з перших у світі науково – дослідною установою метрологічного профілю. Подальша історія розвитку метрології у колишньому СРСР починається з декрету від 14 вересня 1918 р. «Про введення метричної системи мір і ваги». Він сприяв подальшому розвитку науково-дослідних робіт щодо забезпечення єдності вимірювань і розвитку різних напрямків приладобудування.

До 1918 р. метрична система впроваджувалась у колишній Російській імперії факультативно, поряд зі старою російською та англійською (дюймовою) системами. Значні зміни в метрологічній діяльності почали відбуватися після підпису Радою Народних комісарів РРФСР Декрету «О введении международной метрической системы мер и весов». Метрична система на території колишньої Російської імперії впроваджувалась з 1918 до 1927 рр. Можна виділити наступні етапи її розвитку:

30.08.1922 р. – створення української Головної палати мір і ваги та місцевих органів з метрології.

07.01.1966 р. – створення Української республіканської лабораторії державного нагляду за стандартами і вимірювальною технікою.

11.12.1970 р. – відкриття Українського республіканського центру метрології та стандартизації.

24.12.1971 р. – організація Українського республіканського управління Держстандарту СРСР.

24.05.1991 р. – створення Державного комітету УРСР зі стандартизації, метрології та якості продукції.

Розвиток метрології в усі часи був неподільно пов'язаний із загальним розвитком науки, оскільки без уміння швидко, точно та правильно виконувати вимірювання найрізноманітніших фізичних величин неможливі ніякі наукові дослідження. Тому Піфагор і Архімед, Галілей і Ньютон, Лейбніц, Ейлер, Ломоносов, Гаус, Менделєєв – усі вони, а також тисячі інших видатних учених активно працювали над винайденням і вдосконаленням методів вимірювань, навічно пов'язавши свої імена з розвитком метрології. Звичайно, важко передбачити, як розвиватиметься метрологія у ХХІ ст. Але можна з упевненістю відзначити, що її роль і значення в усіх без винятку аспектах суспільного життя будуть тільки зростати.

1.2. Метрологія: суть, предмет, об'єкт та правові основи

Слово «метрологія» походить від грецьких слів: *metron* (міра) і *logos* (поняття).

Метрологія – наука про одиниці, засоби та методи вимірювання, яка включає як теоретичні, так і практичні аспекти вимірювань у всіх галузях науки і техніки.

Предмет метрології – методи визначення і контролю показників якості, правила, положення та норми, способи досягнення єдності і точності вимірювань, методи повірки мір та вимірювальних приладів, фізичні величини і одиниці вимірювань.

Об'єкт метрології – засоби вимірювань: міри, вимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі, допоміжні засоби вимірювань, вимірювальні установки та вимірювальні системи, еталони.

Завдання метрології. Основними завданнями метрології є:

- розвиток загальної теорії вимірювань;
- встановлення одиниць фізичних величин і узаконення певних одиниць вимірювань;
- розробка методик вимірювань та засобів вимірювальної техніки;
- забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань;
- встановлення еталонів одиниць вимірювань;
- проведення регулярної повірки мір та вимірювальних приладів, що знаходяться в експлуатації;
- випробування нових засобів вимірювання тощо.

Правові основи метрології. Метрологічна діяльність регламентується такими нормативно – правовими документами:

– Законом «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 11. 02.1998 р., який розглядає загальні положення – основні терміни та їх визначення, сферу дії Закону, законодавство про метрологію та метрологічну діяльність, державну метрологічну систему, нормативні документи з метрології; одиниці вимірювань, їх відтворення та зберігання, здійснення вимірювань, засоби вимірювальної техніки; застосування, ввезення, виробництво, ремонт, продаж і прокат засобів вимірювальної техніки; метрологічну службу України, її структуру, організацію; державний метрологічний контроль і нагляд, державні випробування засобів вимірювальної техніки і затвердження їх типів, державну метрологічну атестацію засобів вимірювальної техніки, акредитацію на право проведення державних

випробувань, повірки і калібрування засобів вимірювальної техніки, вимірювань; права і обов'язки державних інспекторів з метрологічного нагляду, права та обов'язки державних повірників; метрологічний контроль і нагляд, що здійснюють метрологічні служби центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій; фінансування метро-логічної діяльності;

– Законом «Про забезпечення єдності вимірювань» від 01.12.1997 р.;

– Декретом Кабінету Міністрів України «Про забезпечення єдності вимірювань» від 26.04.1993 р.;

– Наказом Держстандарту України «Типове положення про державні наукові метрологічні центри Держстандарту України» від 2–8.05.1999 р.;

– Наказом Держстандарту України «Про затвердження порядку акредитації вимірювальних лабораторій» від 05.11.1999 р.;

– Держстандартами України: ДСТУ 2568, ДСТУ 2681, ДСТУ 2708, ДСТУ 3215, ДСТУ 3231, ДСТУ 3400, ДСТУ 3651.0, ДСТУ 3651.1, ДСТУ 3651.2, ДСТУ 3921.1, ISO 10012–1;

– Організаційно-методичними керівними нормативними документами (НД) та рекомендаціями: КНД 50-032, Р 50-060-95, Р 50-078, Р 50-080;

– НД на державні повірочні схеми – ДСТУ 2614;

– НД на методи та засоби повірки і контролю – Р 50-076;

– Міждержавними організаційно-методичними документами із метрології: ПМГ 06, ПМГ 07, ПМГ 08, ПМГ 15, ПМГ 16.

1.3. Основні терміни метрології

Основні терміни метрології визначено згідно із Законом про метрологію та метрологічну діяльність (стаття 1), Законом про забезпечення єдності вимірювань, Декретом Кабінету Міністрів про забезпечення єдності вимірювань. У дійсних законодавчих актах застосовуються наступні поняття та визначення:

Вимірювання – відображення фізичних величин їхніми значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів.

Єдність вимірювань – такий спосіб вимірювань, при якому їх результати, виражені в узаконених одиницях і похибках вимірювань, відомі з заданою вірогідністю.

Законодавча метрологія – частина метрології, що відноситься до діяльності, здійснюваної національним органом з метрології відповідно до

державних вимог, що стосуються одиниць, методів, засобів вимірювань і вимірювальних лабораторій.

Метрологічна служба – сукупність суб’єктів діяльності і видів робіт, спрямованих на забезпечення єдності вимірів.

Національний орган з метрології – орган державного керування, уповноважений здійснювати керівництво діяльністю із забезпечення єдності вимірів у державі.

Нормативні документи із забезпечення єдності вимірів (НД) – державні стандарти, застосовувані у встановленому порядку, міжнародні (регіональні) стандарти, правила, положення, інструкції й інші нормативні та методичні документи, що визначають вимоги і порядок проведення робіт із забезпечення єдності вимірів.

Характеристики вимірювань: принцип, метод, одиниця, похибка, точність, правильність і достовірність вимірювань.

Принцип вимірювань – фізичне явище або сукупність фізичних явищ, що покладені в основу вимірювань. Наприклад, вимірювання температури з використанням термоелектричного ефекту;

Метод вимірювань – сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання. Засобами вимірювань є вживані технічні засоби, що мають нормовані метрологічні характеристики;

Одиниця вимірювань – фізична величина певного розміру, прийнята для кількісного відображення однорідних з нею величин;

Похибка вимірювань – це відхилення результату вимірювань від істинного значення вимірюваної величини;

Точність вимірювань характеризується близькістю їх результатів до дійсного значення вимірюваної величини;

Правильність вимірювань – це якість вимірювання, що відображає близькість до нуля систематичних похибок результатів (тобто таких похибок, які залишаються постійними або закономірно змінюються при повторних вимірюваннях однієї й тієї ж самої величини);

Достовірність вимірювань – це довіра до результатів вимірювання. Вимірювання можуть бути достовірними і недостовірними, залежно від того, відомі чи невідомі ймовірні характеристики їх відхилень від дійсних значень відповідних величин. Результати вимірювань, імовірність яких невідома, не мають ніякої цінності і в деяких випадках можуть служити джерелом дезінформації.

Наявність похибок обмежує достовірність вимірювань, тобто вносить обмеження в число достовірних значущих цифр числового значення вимірюваної величини і визначає точність вимірювань.

1.4. Державна метрологічна система України

Першим науковим метрологічним закладом у Російській імперії була закладена Д. І. Менделєєвим Головна палата мір і ваги у Петербурзі. Її основним завданням було збереження одноманітності, вірності та взаємовідповідності державних мір. Головна палата здійснила велику роботу щодо організації метрологічної служби у державі і переходу до метричної системи. Згодом на базі Головної палати мір та ваги був створений Науково-дослідний інститут метрології імені Д. І. Менделєєва (1927 р.). У лабораторіях Інституту розробляються і зберігаються державні еталони основних одиниць вимірювання, нові методи точних вимірювань, сучасні засоби вимірювання та ін.

Верховна Рада України Постановою № 1545–ХІІ від 12 вересня 1991 р. «Про порядок тимчасової дії на території України окремих актів законодавства Союзу РСР» повідомила, що продовжують діяти вимоги постанов Ради Міністрів СРСР та Української РСР щодо організації робіт у галузі стандартизації, метрології та якості продукції. Крім того, слід вважати чинними на території України державні стандарти СРСР, галузеві та республіканські стандарти, технічні умови, будівельні норми, правила та інші нормативно-технічні документи. Відзначаючи міжнародний характер стандартизації, метрології та сертифікації і визнаючи їх необхідність для забезпечення поєднання, взаємозамінності продукції, її безпеки для життя та здоров'я людини й охорони навколишнього середовища, а також усвідомлюючи їх важливе значення в усуненні технічних бар'єрів у торгівельному, економічному й науково-технічному співробітництві, підвищенні ефективності виробництва в межах усієї держави, 13 березня 1992 р. між державами СНД досягнуто угоди про проведення узгодженої політики в галузі стандартизації, метрології та сертифікації.

Угодою передбачено:

- використання і розвиток основних положень діючих систем стандартизації та метрології;
- визнання діючих стандартів ГОСТу як міждержавних;
- збереження аббревіатури ГОСТ за новими міждержавними стандартами;

– проведення робіт зі сертифікації на підставі загальних організаційно – методичних положень;

– визнання існуючих державних еталонів одиниць фізичних величин як міждержавних;

– створення міждержавної Ради зі стандартизації, метрології та сертифікації.

Міждержавна Рада зі стандартизації, метрології та сертифікації здійснює координацію і розробляє рішення щодо проведення узгодженої політики в галузі стандартизації, метрології та сертифікації. Вона складається з повноважних представників держав-учасників узгодження від 13 березня 1992 р. Представниками у Раді є керівники національних органів стандартизації, метрології та сертифікації, які від імені держав наділяються правом бути членами ради й уповноваженими, необхідними для виконання функцій, покладених на цю Раду. Робочим органом Ради є постійно діючий технічний секретаріат.

Виходячи з наведеного, внесено зміну в найменування комітету: Державний комітет України зі стандартизації, метрології та якості продукції (Держстандарт України) перейменовано в Державний комітет України зі стандартизації, метрології та сертифікації:

Метрологічна служба України – одна із ланок державного управління, основними завданнями якого є здійснення комплексу заходів з метрологічного забезпечення діяльності підприємств та організацій, забезпечення єдності і метрологічної точності вимірів, підвищення ефективності виробництва і якості виготовленої продукції. Згідно із Законом «Про метрологію та метрологічну діяльність» (стаття 11). Державна метрологічна служба організовує, здійснює та координує діяльність, спрямовану на забезпечення єдності вимірювань у державі, а також державний метрологічний контроль і нагляд за додержанням вимог цього Закону, інших нормативно-правових актів України та нормативних документів із метрології.

Метрологічна служба – це система спеціально уповноважених органів, діяльність яких спрямовується на забезпечення єдності вимірювань (стаття 10 ДКМУ про забезпечення єдності вимірювань).

До Державної метрологічної служби належать: відповідні підрозділи центрального апарату Держстандарту України; державні наукові метрологічні центри, що належать до сфери управління Держстандарту

України; територіальні органи Держстандарту України в Автономній Республіці Крим, областях, містах Києві і Севастополі та містах обласного підпорядкування; Державна служба єдиного часу й еталонних частот; Державна служба стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів; Державна служба стандартних довідкових даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів.

Державна метрологічна служба й інші державні служби забезпечення єдності вимірів (стаття 10 Закону «Про метрологію та метрологічну діяльність») перебувають у веденні НОМ. До їх складу входять Державний науковий метрологічний центр та регіональні (територіальні) органи Державної метрологічної служби.

Залежно від функцій, які виконує метрологічна служба та згідно із «Законом про метрологію та метрологічну діяльність» (стаття 11 Закону «Про метрологію та метрологічну діяльність»), Метрологічна служба України складається з Державної метрологічної служби та метрологічних служб центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій, тобто відомчої метрологічної служби. Структурну схему Метрологічної служби України наведено на рис. 1.1.

До Державної служби відносять Держстандарт України, Український науково-дослідний інститут стандартизації, сертифікації та інформатики (УкрНДЮОСІ), Український науково – виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації (УкрЦСМ), Територіальні центри Держстандарту України (ТЦДСТУ), Виробниче об'єднання «Еталон». Органи Державної метрологічної служби здійснюють державний метрологічний контроль і нагляд суб'єктів господарювання на закріплених за ними територіях. Державні наукові метрологічні центри несуть відповідальність за створення, удосконалювання, збереження і застосування національних еталонів одиниць величин, а також за розробку нормативних документів із забезпечення єдності вимірів.

До Відомчої метрологічної служби відносять службу Головного метролога відомства та метрологічні служби підприємств і організацій.

У структурі Держстандарту України нараховується: 35 центрів стандартизації, метрології та сертифікації, в тому числі 26 обласних (Укр. ЦСМ, Білоцерківський, Вінницький, Волинський, Дніпропетровський, Донецький, Житомирський, Закарпатський, Івано-Франківський, Кіровоградський, Кримський, Луганський, Львівський, Миколаївський, Одеський, Полтавський,

Рівненський, Тернопільський, Харківський, Херсонський, Хмельницький, Черкаський, Чернігівський, Чернівецький); 9 міських (Горлівський, Дрогобицький, Кременчуцький, Криворізький, Маріупольський, Мелітопольський, Краматорський, Северопольський, Червоноградський).

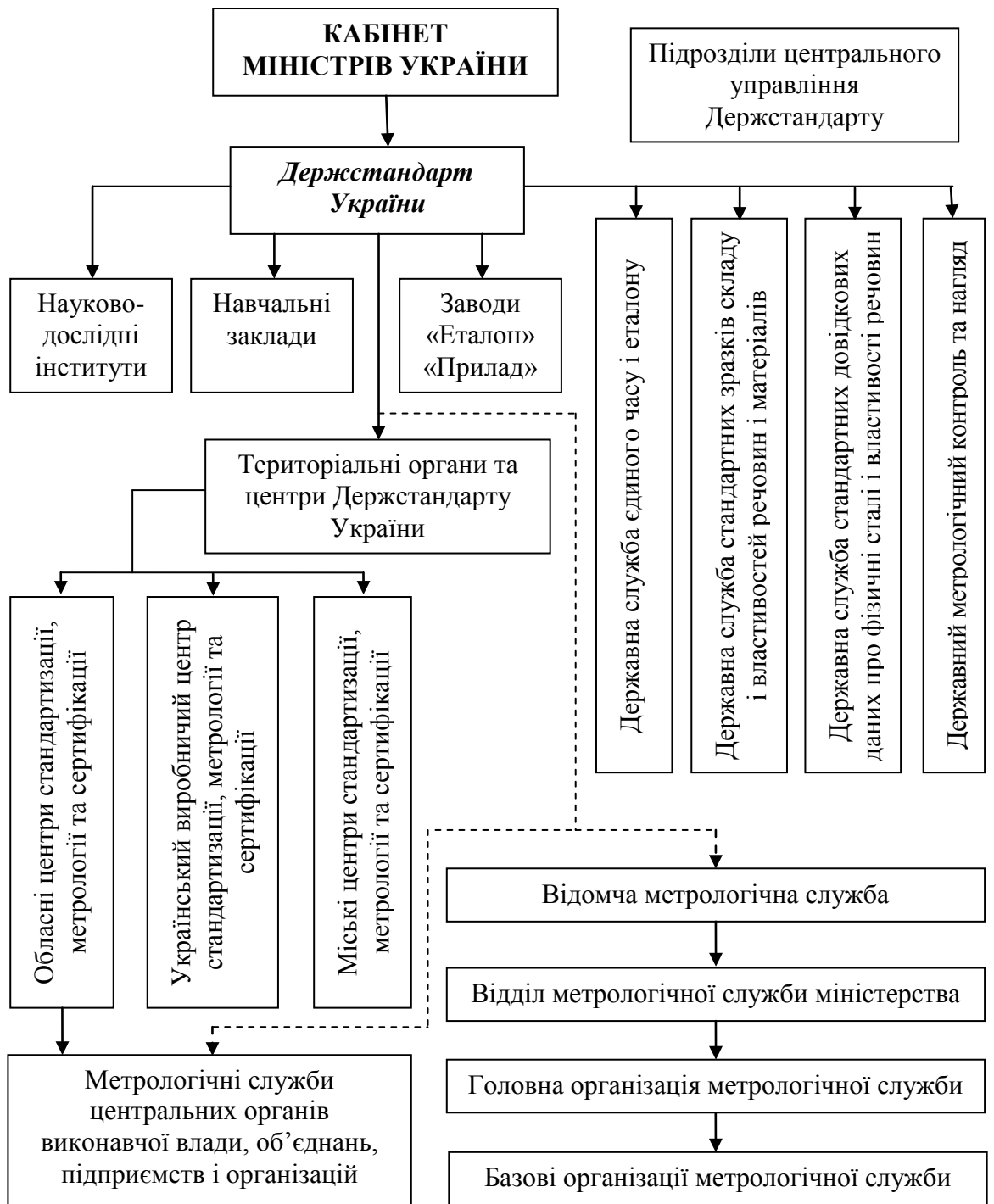


Рис. 1.1. Структурна схема Метрологічної служби України

Крім того, до складу Держстандарту України входять декілька науково – дослідних інститутів: Львівський ДНДІ «Система», Харківське науково – виробниче об'єднання «Метрологія», УкрНДІССІ; два навчальні заклади:

Одеський державний інститут вимірювальної техніки та український навчально-науковий центр у м. Києві; заводи «Еталон» (у Києві, Харкові, Донецьку, Умані, Білій Церкві); дослідні заводи «Прилад» (у Вінниці та Полтаві) і магазини стандартів (у Києві та Харкові).

Держстандарт України здійснює державне управління забезпеченням єдності вимірювань в Україні й організовує проведення фундаментальних досліджень у галузі метрології, створення та функціонування еталонної бази України, проведення повірок засобів вимірювальної техніки та ін.

Рішення Держстандарту України з питань метрології є обов'язковими для виконання центральними та місцевими органами виконавчої влади, органами місцевого самоврядування, підприємствами, організаціями, громадянами – суб'єктами підприємницької діяльності та іноземними виробниками.

На початку ХХІ століття Україна реалізує власний державний суверенітет із метою визначення свого місця серед міжнародного товариства і забезпечення миру, стабільності, добробуту українського народу, а також заради активної участі у світовій торгівлі та науковому співробітництві.

Україні є що запропонувати своїм партнерам – від космічних технологій, продукції суднобудування до ліків і продуктів харчування. Якість вітчизняної продукції базується більш ніж на 200-річному досвіді, вона закріплена відповідними стандартами та сертифікатами.

Україна є членом Світової організації торгівлі (СОТ). Сьогодні багато видів української продукції з успіхом конкурують із кращими світовими зразками. Участь у СОТ потребує подальшого розвитку і удосконалення національної системи стандартизації, метрології та сертифікації у напрямку зближення з міжнародними і європейськими стандартами, угодами і підходами. Цьому сприятиме участь України у Міжнародній організації з питань стандартизації, Міжнародній електротехнічній комісії, Міжнародній організації законодавчої метрології (МОЗМ) та інших міжнародних організаціях, де її представляє Держстандарт:

Законодавчою основою національної метрологічної системи є Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 11 лютого 1998 року № 113/98–ВР, який визначає правові основи забезпечення єдності вимірювань у нашій державі, регулює суспільні відносини у сфері метрологічної діяльності та спрямований на захист громадян і національної економіки від наслідків недостовірних результатів вимірювання.

Технічною основою національної метрологічної системи є система Державних еталонів одиниць фізичних величин. Еталонна база України складається з 28 Державних еталонів одиниць фізичних величин, а саме: маси, довжини, температури, сили світла, часу, частоти, енергії згорання, тиску, об'єму рідини, прискорення сили тяжіння, магнітної індукції, молярної частки компонентів у газовому середовищі тощо.

З метою підвищення ефективності метрологічної діяльності, створюється наукова, технічна та організаційно – правова база метрології. За станом на 1998 рік у сфері метрології діє понад 40 національних нормативних документів (ДСТУ) і понад 350 Міжнародних стандартів (ГОСТів).

1.5. Міжнародні метрологічні організації

Розширення культурних та економічних зв'язків між державами світу потребувало вирішення одного із невідкладних завдань – забезпечення міжнародної єдності вимірювань і одноманітності мір.

Першим кроком до вирішення цієї проблеми стало провадження наприкінці XVIII ст. у Франції метричної системи мір. На думку її творців, вона мала слугувати «на всі часи, для всіх народів».

У 1870 році у Парижі з ініціативи Петербурзької академії наук відбулося засідання, на якому пропонувалося організувати комісію з виготовлення прототипів міри довжини та маси (метра і кілограма). Така комісія була організована, і в 1872 році нею було прийнято рішення про створення платино-іридієвих еталонів метра та кілограма як основних одиниць метричної системи.

Щоб надати метричній системі дійсно міжнародного характеру і забезпечити одноманітність мір в усіх країнах, які її прийняли, необхідно було виготовити і точно звірити один з одним стільки тотожних еталонів метра і кілограма, скільки їх замовлять зацікавлені країни.

Один із еталонів метра і один із еталонів кілограма, найбільш близькі до архівних, слід було прийняти за міжнародні прототипи, а виражену через них решту еталонів розподілити за методом жереб-кування між зацікавленими країнами.

Виготовлення усіх цих еталонів доручили французькій секції комісії, оскільки основна частина роботи за необхідністю повинна бути зосереджена у Парижі – місці знаходження архівних прототипів. Для керівництва

діяльністю французькою секцією призначили постійний комітет із 12 членів – представників різних країн. Комісія рекомендувала заснувати в межах міжнародної конвенції народне бюро мір і ваги (МБМВ) як нейтральну наукову установу для збереження і звірення міжнародних прототипів та їх національних копій.

Метрична конвенція зібралася в Парижі 1 березня 1875 р. у складі 20 держав. Відбулося чотири засідання. На останньому з них 20 травня 1875 р. 17 держав Європи та Америки, у тому числі й Російська імперія, з метою забезпечення міжнародної єдності і вдосконалення метричної системи, підписали Метричну конвенцію.

Вищим органом Міжнародної метричної конвенції є Генеральна конференція з мір і ваги, яка збирається один раз на 6 років для обговорення наукових проблем з метрології та прийняття необхідних заходів щодо розповсюдження та вдосконалення метричної системи. Структурну схему органів міжнародної метричної конвенції наведено на рис. 1.2.

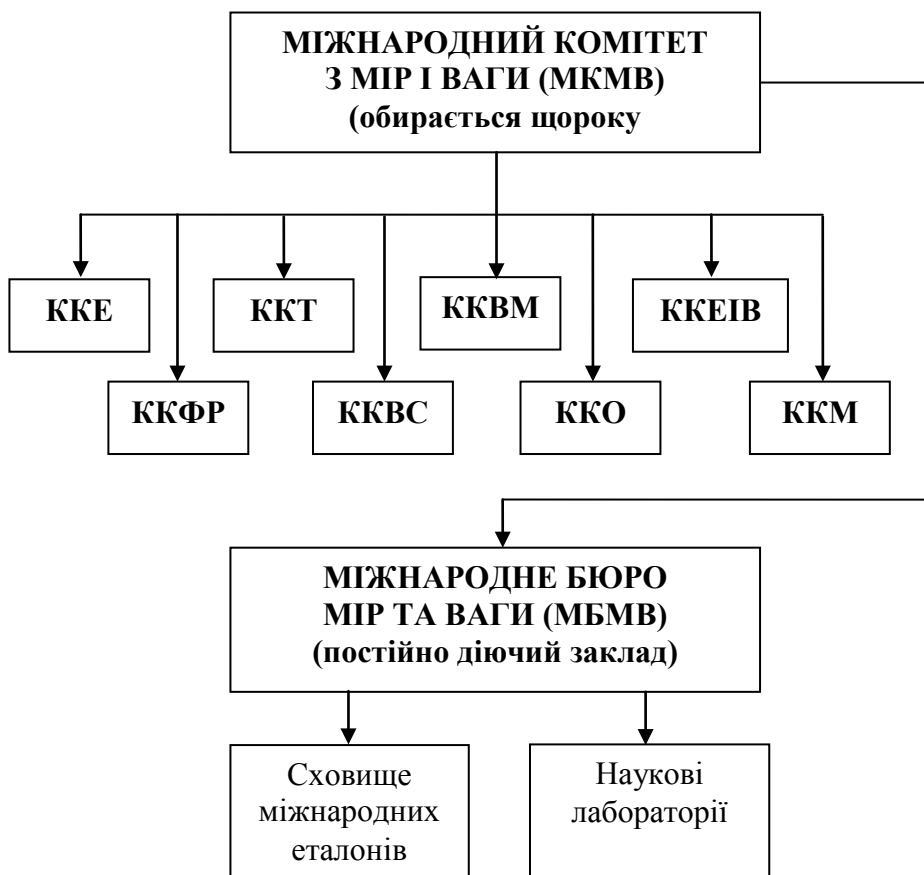


Рис. 1.2. Органи міжнародної метричної конвенції: консультативні комітети: ККЕ – з електрики, ККФР – фото та радіометрії, ККТ – з термометрії, ККВМ – з визначення метра, ККВС – з визначення секунди, ККЕІВ – з еталонів іонізуючого випромінювання, ККО – з одиниць, ККМ – з визначення маси.

Одним із важливих положень Метричної конвенції є затвердження нею згоди держав на утворення Міжнародного бюро мір і ваги (МБМВ) як наукового постійно діючого метрологічного закладу для наукової роботи та сприяння поширенню метричної системи мір у міжнародному масштабі.

Діяльністю МБМВ керує Міжнародний комітет мір і ваги (МКМВ), який щороку заслуховує і затверджує звіт про роботу бюро, його плани та фінансування тощо. При МКМВ працюють 8 консультативних комітетів (див. рис. 1.2).

Міжнародне бюро мір і ваги розташоване у Севрі (поблизу Парижа). В його спеціальних приміщеннях зберігаються міжнародні еталони метра, кілограма, електричних і світлових одиниць, радіоактивності тощо. Бюро організовує регулярні міжнародні звіряння національних еталонів довжини, маси, електрорушійної сили, електричного опору, сили світла, світлового потоку, джерела іонізаційного випромінювання та інших зразків мір.

У 1956 році було утворено Міжнародну організацію законодавчої метрології (МОЗМ) з метою вирішення таких завдань:

- створення центру документації й інформації про національні служби контролю за вимірювальними приладами та з метою їх перевірки;
- уніфікація методів і правил вирішення завдань законодавчої метрології;
- переклад і випуск текстів законодавчих правил про вимірювальні засоби та їх використання;
- складання типових проектів законів і регламентів щодо вимірювальних засобів та їх використання;
- розробка проекту матеріальної організації типової служби для перевірки вимірювальних приладів і контролю за ними;
- розробка характеристик та якості вимірювальних приладів, які використовуються у міжнародному масштабі.

У складі Міжнародної організації законодавчої метрології є Міжнародне бюро законодавчої метрології, розташоване у Парижі. Його роботою керує комітет законодавчої метрології. У Міжнародній організації законодавчої метрології функціонує 66 секретаріатів – доповідачів, які розробляють як загальні питання законодавчої метрології, так і питання щодо окремих видів приладів (ваги, тахометри, манометри, спиртометри та ін.).

Нині Міжнародну метричну конвенцію підписали 44 держави, а метрична система мір визнана й узаконена 129 державами.

З 1 січня 2016 року набере чинності Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05.06.2014 р. № 1314–VII. Примітно, що метрологічний нагляд являє собою діяльність, здійснювану у сфері законодавчо регульованої метрології з метою перевірки дотримання суб'єктами господарювання вимог новопеченого Закону, технічних регламентів та інших нормативно-правових актів у сфері метрології та метрологічної діяльності.

Запитання для самоконтролю до теми 1

1. Що таке вимірювання?
2. Що таке єдність вимірювань?
3. Що таке законодавча метрологія?
4. Для чого потрібна метрологічна служба?
5. Для чого створений національний орган з метрології?
6. Що таке характеристики вимірювань?
7. Що таке принцип вимірювань?
8. Що таке метод вимірювань?
9. Що таке одиниця вимірювань?
10. Що таке похибка вимірювань?
11. Що таке точність вимірювань?
12. Що таке правильність вимірювань?
13. Що таке достовірність вимірювань?

Тема 2. Фізичні величини

План

- 2.1. Класифікація фізичних величин
- 2.2. Системи одиниць фізичних величин
- 2.3. Одиниці фізичних величин міжнародної системи SI

2.1. Класифікація фізичних величин

Поняття фізичної величини (ФВ) – одне з найбільш загальних понять у фізиці та метрології. Під ФВ (ДСТУ 268 – 194) слід розуміти властивість, загальну в якісному відношенні для безлічі матеріальних об'єктів, але індивідуальну в кількісному відношенні для кожного з них. Так усі об'єкти мають масу і температуру, але для кожного конкретного об'єкта як маса, так і температура різні залежно від різних обставин.

Для встановлення різниці в кількісному відношенні властивостей кожного об'єкта вводиться поняття «розмір ФВ».

Між розмірами кожної ФВ існують відносини, які мають таку ж саму логічну структуру, що й між числовими формами (цілими, раціональними, дійсними числами, векторами). Тому численність числових форм з відносинами між ними може слугувати моделлю ФВ, тобто безлічі її розмірів і відносин між ними.

Можна виділити три групи ФВ, вимірювання яких проводиться за принципово різними правилами.

До першої групи належать величини, безліч розмірів яких визначаються за відношенням типу «твердий/м'який», «тепле/холодне», «кисле/солодке» та ін. У математиці такі відносини отримали назву «відносини порядку та еквівалентності». Наявність подібних відносин встановлюється теоретично, виходячи із загальних фізичних міркувань, або експериментально, за допомогою засобів вимірювання й експериментатора. Так без особливих зусиль можна визначити, що мідь твердіша за гуму, але визначити відмінність міді за твердістю з іншими металами (свинцем, оловом) без засобів вимірювання неможливо, тому що їх твердість відрізняється незначно.

Друга група величин характеризується тим, що відношення порядку й еквівалентності стосується не тільки розмірів величин, а й відмінностей у

парах цих величин (потенціал, енергія, температура та ін.). Так інтервал температур буде однаковим, якщо будуть однакові відстані між поділками на шкалі ртутного термометра. Мова йде не про температуру як ступінь нагрівання, а лише про рівність інтервалів температур.

До третьої групи величин, крім зазначених раніше визначень, відносяться характерні відносини, які називаються операціями, подібно до арифметичного додатка (множення на n) та вирахування. Результат відповідає сумі n розмірів певної вимірюваної величини. До таких величин відносяться: довжина, тиск, маса, термодинамічна температура і т. д.

До величин третьої групи можна віднести і безліч інтервалів розмірів величин другої групи, тому що для них можливо встановити операцію, подібну до додатка. Отже, ці величини є найбільш зручними для використання. Тому їх і називають фізичними.

Між властивостями об'єкта існують взаємозв'язки: *модель об'єкта описується сукупністю рівнянь, які називаються рівняннями між величинами.*

У кожному розділі науки кількість рівнянь завжди менша, ніж кількість вхідних величин. Тому в окрему групу прийнято виділяти величини, кількість яких дорівнює різниці між кількістю величин і кількістю незалежних рівнянь.

Ці величини і відповідні їм одиниці вимірювання називаються основними величинами і основними одиницями. Решта величин та одиниць, які однозначно визначаються через основні, називаються похідними.

ФВ поділяються на вимірювані й оцінювані.

Вимірювані ФВ можуть бути виражені кількісно у вигляді певного числа встановлених одиниць виміру. ФВ, для яких неможливо ввести одиницю виміру, можуть бути тільки оцінювальними (землетрус – 7 балів, шторм – 10 балів, твердість за шкалою Мооса – 5 балів і т. д.).

За видами появи ФВ поділяються на 3 групи:

– речовинні (пасивні), тобто ті, що описують фізичні та фізико-хімічні властивості речовин, матеріалів і виробів з них. До цієї групи належить маса, щільність (питома вага), електричний опір, ємність, індуктивність та ін. Іноді наведені ФВ називають пасивними. Для їх вимірювань необхідно використовувати додаткові джерела енергії, за допомогою яких формується сигнал інформації, що вимірюється. При цьому пасивні ФВ перетворюються в активні, які й вимірюються;

– енергетичні (активні), тобто величини, які описують характеристики процесів перетворення, передачі і використання енергії. До них відносяться

струм, напруга, потужність, енергія. Ці величини називають активними. Вони можуть бути перетворені на сигнали вимірювальної інформації без використання додаткових джерел енергії;

– які характеризують протікання процесів у часі. До цієї групи відносяться різного виду спектральні характеристики, кореляційні функції та ін.

За належністю до різних груп фізичних процесів ФВ поділяються на просторово-тимчасові, механічні, теплові та ін.

За ступенем умовної незалежності від інших величин даної групи ФВ поділяються на основні (умовно незалежні), похідні (умовно залежні) та позасистемні.

За наявності розмірності ФВ поділяються на розмірні, тобто ті, які мають розмірність, і безрозмірні.

ДСТУ 2681–94 наводить наступні терміни:

Розмір (фізичної) величини – кількісний вміст ФВ у даному об'єкті. Не слід використовувати термін «величина» як кількісну характеристику даної властивості, наприклад, у термінах «величина напруги», «величина маси» та ін. У таких випадках слід використовувати термін «розмір напруги», «розмір маси».

Основна (фізична) величина – ФВ, що входить до системи ФВ і прийнята за незалежну від інших величин цієї системи.

Похідна (фізична) величина – ФВ, що входить до системи величин та визначається через основні величини цієї системи.

Розмірність фізичних величин – вираз, що відображає її зв'язок з основними величинами системи величин.

Розмірність основної фізичної величини – умовний символ ФВ у даній системі величин.

Класифікація одиниць вимірювання фізичних величин представлена на рис. 2.1.

Основна фізична величина – величина, умовно прийнята в якості незалежної від інших фізичних величин. Прикладом основної фізичної величини можуть служити довжина, маса тощо (див. табл. 2.1).

Основна одиниця фізичної величини – одиниця основної фізичної величини в даній системі одиниць (див. табл. 2.2).

Похідна фізична величина – фізична величина, що визначається через основні величини цієї системи. До похідних величин відносяться об'єм, площа, швидкість руху, відносна щільність та ін.

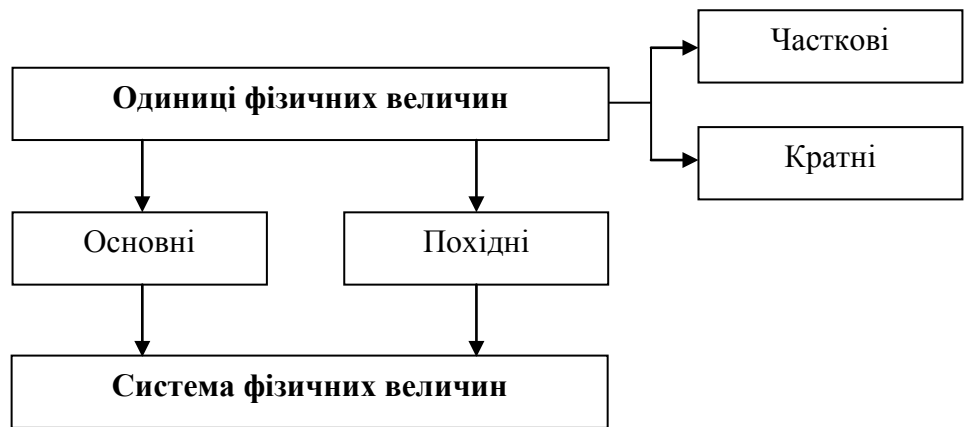


Рис. 2.1. Класифікація одиниць вимірювання фізичних величин

Похідна одиниця фізичної величини – одиниця похідної фізичної величини. Похідні фізичні величини можуть бути отримані з однойменних або різнойменних фізичних величин. Прикладом однойменних величин можуть служити частинні одиниці маси – грам, міліграм або кратні – тонна (т), центнер (ц), а різнойменних – метр в секунду (м/с), грам на дециметр кубічний (г/дм³) і тощо.

Система фізичної величини – сукупність взаємопов'язаних основних і похідних одиниць фізичних величин.

Першою системою одиниць фізичних величин була метрична система, в якій спочатку було дві основні одиниці: метр – одиниця довжини і грам – одиниця ваги. Метрична система спочатку була прийнята у Франції (1840), потім у Німеччині (1849). Надалі вона була допущена поряд з національними системами у Великобританії (1864), США (1866), Росії (1899).

Однак поряд з метричною системою в інших країнах використовувалися і національні системи, які історично склалися і, які застосовуються і в даний час. Наприклад, у Великобританії, США і Канаді досі використовуються одиниці, які мають цілочисельне десяткове співвідношення з метричною системою.

У 1960 р XI Генеральна конференція з мір та ваг затвердила Міжнародну систему одиниць, що містить шість основних фізичних величин і позначається скорочено SI (Système International Unites), в українській транскрипції – СІ. У 1970 р ця система була доповнена сьомою основною фізичною одиницею – кількістю речовини – молям. У 1980 р СІ була прийнята в нашій країні.

Одиниці виміру є одним з об'єктів закону «Про забезпечення єдності вимірювань» (ст. 6), в якому регламентуються вимоги до одиниць величин. Вимоги до одиниць величин полягають в наступному:

1) Застосовуються одиниці величин Міжнародної системи одиниць, прийняті Генеральною конференцією з мір та ваг (ГКМВ) і рекомендовані до застосування Міжнародною організацією законодавчої метрології. Найменування одиниць величин, що допускаються до застосування в Україні, їх позначення, правила написання, а також правила їх застосування встановлюються Урядом України;

2) Характеристики і параметри продукції, що поставляється на експорт, в тому числі засобів вимірювань, можуть бути виражені в одиницях величин, передбачених договором (контрактом), укладеним із замовником;

3) Одиниці величин передаються засобам вимірювань, технічним системам і пристроям з вимірювальними функціями від еталонів одиниць величин і стандартних зразків.

В Україні позасистемними одиницями вимірювань є, наприклад, градус Цельсія і кілокалорія поряд з Кельвіном і Джоулем.

Відповідно до рішень Генеральної конференції з мір та ваг (ГКМВ), прийнятими в різні роки, діють наступні визначення основних одиниць СІ.

Одиниця довжини – *метр* – довжина шляху, прохідного світлом у вакуумі за $1/299792458$ частки секунди (рішення XVII ГКМВ в 1983 р)

Одиниця маси – *кілограм* – маса, рівна масі міжнародного прототипу кілограма (рішення I ГКМВ в 1889 р)

Одиниця часу – *секунда* – тривалість 9192631770 періодів випромінювання, відповідного переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію – 133, що не обуреного зовнішніми полями (рішення XIII ГКМВ в 1967 р).

Одиниця сили електричного струму – *ампер* – сила незмінного струму, який при проходженні по двом паралельним провідникам нескінченної довжини і мізерно малого колового перетину, які розташовані на відстані 1 м один від одного у вакуумі, створив би між цими провідниками силу, рівну $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожен метр довжини.

Одиниця термодинамічної температури – *кельвін* – (до 1967 р мав найменування градус Кельвіна) – $1/273,16$ частина термодинамічної температури потрійної точки води. Допускається вираз термодинамічної температури в градусах Цельсія (резолуція XIII ГКМВ 1967).

Одиниця кількості речовини – *моль* – кількість речовини системи, що містить стільки ж структурних елементів, скільки атомів міститься в нуклідів вуглеводу – 12 масою 0,012 кг (резолуція XIV ГКМВ 1971).

Одиниця сили світла – *кандела* – сила світла в заданому напрямку джерела, що випускає монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямку становить $1/683$ Вт/ср (резолюція XVI ГКМВ 1979 г.).

Як зазначалося, поряд з системними одиницями СІ допускається застосування позасистемних одиниць. Прикладом позасистемних одиниць маси, які є похідними від кілограма, можуть служити тонна, центнер, пуд, карат, золотник та ін..

Похідні одиниці фізичних величин підрозділяються на системні та позасистемні, а по відношенню до основних одиниць – на кратні і часткові. Кратна одиниця фізичної величини – одиниця фізичної величини, в ціле число разів більша системної або позасистемної одиниці. Часткова одиниця фізичної величини – одиниця фізичної величини в ціле число разів менша системної або позасистемної одиниці.

Прикладом кратної одиниці довжини основній одиниці – *метру* – служать *кілометр*, а частковій – *міліметр*, *сантиметр*, *дециметр*. Для зручності застосування одиниць фізичних величин прийняті приставки для утворення кратних і часткових одиниць, наприклад -деци, -санти та ін.

2.2. Системи одиниць фізичних величин

Історично першою системою одиниць ФВ була прийнята (7 квітня 1795 року Національними зборами Франції) метрична система мір. До її складу увійшли одиниці довжини, площі, об'єму і ваги, в основу яких було покладено дві одиниці: метр та кілограм.

Наприкінці XVIII ст. у Франції було розроблено метричну систему мір, засновану на «природних» еталонах – метру та кілограмі. Метр було визначено як довжину однієї десятимільйонної частини чверті Паризького меридіана (Комісія під керівництвом Лапласа). На основі вимірів дуги меридіана було виготовлено перший еталон метра у вигляді платинової кінцевої міри довжиною 1 м, шириною 25 мм і товщиною 4 мм, названої «метром Архіву». У 1872 р. «метр Архіву» був прийнятий в якості прототипу метра для того, щоб уникнути розбіжностей у визначенні «природного» метра через похибки вимірювань.

За новим прототипом був виготовлений 31 еталон у вигляді штрихових мір з платино-іридієвого сплаву, який відрізнявся високою стабільністю розмірності в часі. Кожен еталон являв собою брус довжиною 102 см X–

подібного перетину, розміром 20x20 мм, зі штрихами, нанесеними по краях на відстані 1 м один від одного. Еталон № 6 у 1889 р. був затверджений як міжнародний прототип метра. Еталон № 28, отриманий Радянським Союзом, був у подальшому затверджений (до 1960 р.) Державним еталоном СРСР.

Пошуки нового «природного» еталона, неруйнівного та такого, який мав би велику точність, а також розвиток інтерференційного методу вимірювань дозволили в 1960 р. прийняти нове визначення метра в довжинах хвилі світла, що відповідає помаранчевій лінії спектра криптону-86, і створити сучасний еталон метра.

У 1882 році вчений К. Гаус запропонував методику побудови системи величин і одиниць як сукупність основних похідних. Він побудував систему величин, у якій за основу були прийняті три довільних, незалежних одна від одної величини: *довжина, маса та час*. Інші величини визначалися за допомогою обраних трьох. Цю систему величин, що відповідним чином пов'язана з трьома основними величинами (довжиною, масою і часом), К. Гаус назвав абсолютною системою. Основними одиницями він запропонував ввести *міліметр, міліграм і секунду*. З наступним розвитком науки і техніки виникли інші системи одиниць ФВ, які відрізнялися одна від одної одиницями ФВ.

У даний час на практиці застосовуються тільки три системи: СГС, СІ та МКГСС. Розглянемо основні системи одиниць ФВ.

1. Система СГС. У 1881 році Першим Міжнародним конгресом електриків була прийнята система одиниць ФВ СГС, до складу якої основними одиницями увійшли: *сантиметр* – одиниця довжини; *грам* – одиниця маси і *секунда* – одиниця часу, а також похідні: *дина* – одиниця сили і *ерг* – одиниця роботи. Для вимірювання потужності у системі СГС була прийнята одиниця *ерг за секунду*, для вимірювання кінетичної в'язкості – *стокс*, динамічної в'язкості – *пуаз*. Вимірювання тиску в системі СГС прийнято в динах на квадратний сантиметр.

Ця система надзвичайно широко використовується не тільки в наукових дослідженнях (фізиці, астрономії), але і в деяких інженерних областях.

Основними перевагами системи СГС є логічність та послідовність її побудови. При описі електромагнітних явищ у системі наявна лише одна константа – швидкість світла, наявність якої дуже доречна в електромагнітній теорії світла і теорії відносності. Головний недолік системи

СГС полягає в тому, що переважна більшість її одиниць безпосередньо на практиці не застосовується (особливо це стосується одиниць електричних величин).

Здійснюючи розрахунки результатів експериментів у системі СГС, доводиться спочатку дані вимірювань, які зняті зі шкал приладів, перевести в одиниці СГС, а потім по завершенні розрахунків здійснити зворотний перерахунок. При цьому, як правило, співвідношення між одиницями СГС і СІ незручні для перекладу. Так вольт дорівнює $1/300$ одиниці СГС, а ампер – $3 \cdot 10^9$ одиниць СГС. Але і ці числа лише наближені, так як, наприклад, ампер більш точно повинен наближатися до одиниці СГС, як одна десята за швидкість світла у вакуумі, виміряна в сантиметрах у секунду.

Незручність полягає і в тому, що, за малим винятком, одиницям СГС не присвоєно спеціальні найменування. Однак, можна стверджувати, що самі розрахунки в одиницях системи СГС здійснювати зручно і відносно просто при практичних обчисленнях.

Хоча формально основними в системі СГС є три одиниці: сантиметр, грам і секунда, фактично при описі теплових явищ завжди в якості четвертої одиниці вводиться одиниця температури кельвін, у світлотехніці – одиниця світлового потоку люмен, у молекулярній та атомній фізиці – одиниця кількості речовини моль і т. п.

Для механічних і магнітних вимірювань сьогодні є чинними сім видів СГС, із яких найпоширеніші такі: СГСЕ (*електростатична*), СГСМ (*електромагнітна*), СГСЛ (*система світлових одиниць*), СГС (*симетрична*) та ін. Значна кількість фізичних констант і на сьогодні виражається в одиницях СГС.

2. Система МКГСС. Система МКГСС (найстаріша з усіх систем) має основним своїм недоліком обмежену область можливого застосування – тільки для механічних вимірювань. Її захищають фахівці в галузі технічної механіки, опору матеріалів та суміжних дисциплін.

Наприкінці XVIII ст. кілограм було прийнято за одиницю ваги. Використання кілограма як одиниці ваги, а пізніше як одиниці сили в кінці XIX ст. зумовило формування нової системи одиниць фізичних величин із трьома одиницями: *метр* – одиниця довжини, *кілограм-сила* (кгс) – одиниця сили і *секунда* – одиниця часу (система МКГСС). *Кілограм-сила* – це сила, яка надає масі один кілограм прискорення $9,80665 \text{ м/с}^2$ (нормальне прискорення вільного падіння).

Система МКГСС набула значного поширення в механіці та техніці й неофіційно називалася «технічною». Однією з причин широкого використання системи виявилася зручність подання сили в одиницях ваги і розмір основної одиниці сили – *кілограм-сила*.

Проте поширення МКГСС має все більше недоліків, зумовлених використанням її як головної одиниці сили, а не маси.

Першим недоліком системи є те, що одиниця маси є похідною від одиниці сили і дорівнює 9,80665 кг, а це порушує метричний принцип десятковості мір.

Другий недолік полягає у назві одиниці сили – «кілограм-сила» і метричній одиниці маси – «кілограм», що часто призводить до заплутаності у назвах. (Деякі держави ввели нову назву кілограм-сили – кілоноїд).

Третім недоліком системи МКГСС є її неузгодженість з одиницями електричних та механічних величин. За одиницю роботи й енергії в системі МКГСС прийнято *кілограм-силу-метр*, у системі практичних електричних одиниць робота й енергія вимірюються джоулями, що змушує вдаватися до використання перехідних коефіцієнтів при розрахунках.

Крім того, виникає велика заплутаність при визначенні маси. За одиницю маси у системі МКГСС прийнято вважати масу тіла, якому надається прискорення 1 м/с^2 під дією прикладеної сили в 1 кгс. Цю одиницю – *кілограм-сила-секунда у квадраті на метр* ($\text{кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м}$) – інколи називають технічною одиницею маси (т.о.м.), або інертною, хоча такі визначення не прийняті у техніці ($9,81 \text{ кг}$ ($1 \text{ кг}\approx 1 \text{ кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м}$ – одиниця маси в системі СІ).

Проте в техніці широко використовувалися такі міри системи МКГСС, як одиниця роботи й енергії – *кілограм-сила-метр* ($\text{кгс}\cdot\text{м}$) та одиниця потужності – *кілограм-сила-метр за секунду* ($\text{кгс}\cdot\text{м}/\text{с}$).

3. Система МТС. Основними одиницями системи МТС є: одиниця довжини – метр, одиниця маси – тонна і одиниця часу – секунда. Цю систему вперше було введено в 1919 році у Франції.

Прийняття тонни за основну одиницю маси здавалося вдалим, тому що забезпечувало відповідність між одиницями довжини та об'єму й одиницею маси: *одна тонна відповідала одному кубічному метру*. Таке співвідношення було ефективним при інженерних розрахунках.

Крім того, одиниця роботи та енергії в цій системі (кілоджоулів) і одиниця потужності (кіловат) збігалися з відповідними кратними практичними електричними одиницями.

У системі МТС за одиницю сили прийнято *стен* (сн), що дорівнює силі, яка надає масі в одну тонну прискорення 1 м/с^2 , а за одиницю тиску – *п'езу* (пз) (сн/м^2).

Проте в нашій країні ця система не знайшла практичного використання і не ввійшла до Держстандарту, а в 1961 була законодавчо відмінена й у Франції.

4. Міжнародна система одиниць SI. Наявність численних систем одиниць ФВ, а також значної кількості позасистемних одиниць спричинило багато незручностей при переході

від однієї системи одиниць в іншу, а отже, потрібно було якомога швидше уніфікувати одиниці вимірювання. Необхідна була система одиниць ФВ, яка була б зручною для практичних вимірювань у галузях вимірювань та зберігала б принцип когерентності.

Так система МКГСС успішно використовувалася в механіці та прикладних науках, але не узгоджувалася з практичними електричними одиницями. Розміри одиниць системи СГС широко застосовувалися у фізиці, але були занадто незручні для використання в техніці.

У результаті тривалої і нелегкої роботи вдалося створити Міжнародну систему, настільки ж всеосяжну, як і система СГС. Ця система по праву отримала назву Міжнародної, оскільки в її створенні взяли участь метрологічні організації багатьох країн.

Основні труднощі при побудові системи полягали в необхідності «зшити» електричні та магнітні одиниці з одиницями механічними. Це було досягнуто шляхом уведення двох постійних величин – *електричної та магнітної*. У результаті до деякої міри втрапилася наочність запису рівнянь електромагнітного поля і особливо теорії відносності. Зокрема, векторні характеристики поля E , D , B і H , які за фізичним змістом повинні бути однорідними, втрачають цю однорідність. Така незручність існує при викладанні матеріалу про електричні та магнітні явища, тому що магнітна взаємодія струмів, на якій засновано визначення основної одиниці – ампера, вивчається слідом за навчальними відомостями про електростатику і постійний струм.

Зазначені недоліки незначні порівняно з великими перевагами Міжнародної системи. У першу чергу, слід вказати на єдність вираження енергії при описі як механічних, так і електричних та магнітних систем: $\text{джоуль} = \text{ньютон} \times \text{метр} = \text{вольт} \times \text{кулон} = \text{ампер} \times \text{вебер}$.

Важливим є те, що переважне число вимірюваних величин є одиницями які давно увійшли в інженерну практику і знаходяться на шкалах приладів. При розрахунках не потрібно проводити жодних попередніх перетворень одиниць. Це, зокрема, відноситься до теплових розрахунків, у яких передбачається повний перехід від роздільного вимірювання роботи і кількості теплоти в джоулях та калоріях до єдиного виміру в джоулях. Всі перераховані, а також деякі інші переваги Міжнародної системи зробили її досить популярною і сприяють її широкому поширенню. Звичайно, важливу роль при цьому відіграє її міжнародний характер, що є суттєвим для промислової кооперації, торговельного обміну та ін.

У 1954 році X Генеральна конференція з мір і ваги встановила шість основних одиниць (*метр, кілограм, секунда, ампер, градус Кельвіна, свіча*) системи одиниць для міжнародних відносин.

На цей час членами Метричної конференції стали близько 40 найбільш розвинених держав. Одночасно Міжнародний комітет з мір і ваги створив комісію розробки Міжнародної системи одиниць. Система отримала назву Міжнародної системи одиниць, скорочено – SI (*S та I – початкові літери французької назви Systeme International d'Unites*), українською мовою – СІ.

Прийняття Міжнародної системи в 1960 році XI Генеральною конференцією з мір та ваги було важливим прогресивним актом, який закріпив велику багаторічну працю з цього питання й узагальнив досвід роботи наукових організацій з метрології, стандартизації, фізики й електротехніки.

Міжнародна система одиниць прийнята Міжнародним союзом фізиків, Міжнародною електротехнічною комісією та іншими міжна-родними організаціями. Організація об'єднаних націй з освіти, науки і культури (ЮНЕСКО) закликала всі країни прийняти Міжнародну систему одиниць. Сьогодні 115 держав приєдналися до Метричної конвенції, і в більшості країн система SI визнана чинною законодавчо.

У 1981 році було введено в дію стандарт ГОСТ 8.417-81 «Одиниці фізичних величин», у якому за основу взято і затверджено до обов'язкового виконання Міжнародну систему одиниць.

У 1997 році Держстандарт України ухвалив постанову про введення в державі Міжнародної системи одиниць ДСТУ 3651.097 «Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної систем одиниць. Основні назви, положення та позначення».

Перевагами Міжнародної системи одиниць SI слід вважати такі:

- універсальність, що забезпечує її використання в науці, техніці і господарстві;
- уніфікованість одиниць для всіх видів вимірювання. Так, замість кількох одиниць тиску (атм, мм р ст., мм вод. ст., бар та ін.) у SI визнана одиниця тиску – *паскаль* (Па); замість кількох одиниць роботи й енергії ухвалена одиниця – *джоуль* (Дж);
- когерентність (узгодженість) системи: коефіцієнти пропорційності у фізичних рівняннях для визначення похідних величин дорівнюють одиниці;
- використання зручних для практичних вимірювань основних та похідних одиниць;
- чітке розмежування одиниць маси (кілограм) і сили (ньютон);
- спрощений запис рівнянь і формул завдяки відсутності перехідних коефіцієнтів переведення однієї системи в іншу;
- позбавлення необхідності визначати всі системи одиниць;
- сприяння розвитку міждержавних науково-технічних і економічних зв'язків.

2.3. Одиниці фізичних величин міжнародної системи SI

У 1954 році X Генеральна конференція з мір та ваги визначила шість основних одиниць ФВ, які повинні охоплювати всі галузі науки і техніки, бути основними для утворення похідних одиниць, забезпечувати зручність для практичних вимірювань і відтворюватися за допомогою установок та еталонів з найбільшою точністю.

У наступні роки Генеральна конференція прийняла ряд доповнень і змін, у результаті чого в системі налічувалося сім основних одиниць (у 1971 році XIV Генеральна конференція з мір та ваги затвердила сьому основну одиницю кількості речовини – *моль*), похідні та позасистемні одиниці ФВ, а також розробила такі визначення основних одиниць:

- *одиниця довжини – метр* – довжина шляху, яку проходить світло у вакуумі за $1/299792458$ долю секунди;
- *одиниця маси – кілограм* – маса, що дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма;
- *одиниця часу – секунда* – тривалість 9192631770 періодів випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими

рівнями структури основного стану атома цезію-133 за відсутності збурення з боку зовнішніх полів;

- *одиниця сили електричного струму* – ампер – сила струму незмінної величини, яка при проходженні по двох паралельних нескінченних провідниках і мізерно малого кругового перерізу, що знаходяться на відстані 1 м один від одного у вакуумі, створював би між цими провідниками силу, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожний метр довжини;
- *одиниця термодинамічної температури* – кельвін – $1/273,16$ (до 1967 р. одиниця мала назву «градус Кельвіна») частина термодинамічної температури потрійної точки води. Допускається також застосування шкали Цельсія;
- *одиниця кількості речовини* – моль – кількість речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки атомів міститься в нукліді вуглецю-12 масою 0,012 кг;
- *одиниця сили світла* – кандела – сила світла в заданому напрямку джерела, яке випромінює монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила якого в цьому напрямку складає $1/683$ Вт/ср².

У 1893 р в Німеччині, а потім в Австрії, Швейцарії та в скандинавських країнах в якості одиниці сили світла була прийнята «свічка Хефнера» [5], запропонована в 1884 р. Ф.Хефнер-Альтенек. Еталоном при цьому служила гнотова лампа спеціальної конструкції. Як пальне в ній використовувався амілацетат.

У 1896 р Міжнародним електротехнічним конгресом була прийнята «десятькова свічка» рівна 1,12 свічки Хефнера.

У 1909 р десятькова свічка була замінена «міжнародної свічкою», рівної 1,11 свічки Хефнера. Міжнародна свічка відтворювалася не за допомогою гнотової лампи, а за допомогою спеціальних ламп розжарювання.

У 1948 р відбулося рішення про прийняття нової одиниці – *кандели*. Кандела базувалася на використанні світлового еталону, що володіє властивостями, близькими до властивостей абсолютно чорного тіла (планківського випромінювача). Випромінювачем світла в ідеалі служила трубка, виготовлена з плавненого окису торію та оточена з усіх боків платиною, що знаходиться при температурі затвердіння (2046,6 К).

Кандела визначалася як сила світла, випромінюваного в напрямку нормалі з $1/60$ см² поверхні що випромінює зазначеного зразка. Введена

таким чином кандела була в 1,005 разів менше, ніж міжнародна свічка [6]. Вона використовувалася в якості одиниці сили світла аж до 1979 р..

У 1979 р XVI Генеральна конференція з мір та ваг прийняла чинне визначення кандели.

У 2011 р XXIV Генеральна конференція з мір та ваг прийняла резолюцію [7], в якій, зокрема, запропоновано у майбутній ревізії Міжнародної системи одиниць прийняти нове визначення кандели.

Передбачуване нове визначення, що кваліфікується в резолюції, як повністю еквівалентне існуючого, сформульовано таким чином: «Кандела, символ cd, є одиницею сили світла в даному напрямку; її величина визначена шляхом встановлення чисельного значення світлової ефективності монохроматичного випромінювання з частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц в точності рівним 683, якщо воно виражено одиницею $\text{СІ } \text{м}^{-2} \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \text{кд} \cdot \text{ср}$, або $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{Вт}^{-1}$, яка дорівнює $\text{лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ».



Рис. 2.2. Лампа Хефнера – еталон «свічки Хефнера»

Наведені визначення досить складні і вимагають достатнього рівня знань, перш за все, у фізиці. Але вони дають уявлення про природне походження прийнятих одиниць, а тлумачення їх ускладнювалося у міру розвитку науки і завдяки новим високим досягненням теоретичної та практичної фізики, механіки, математики й інших фундаментальних галузей знань.

Це дало можливість, з одного боку, представити основні одиниці як достовірні і точні, а з іншого – які можна пояснити і які зрозумілі для всіх

країн світу, що є головною умовою для того, щоб система одиниць стала міжнародною. Міжнародна система СІ вважається найбільш досконалою і універсальною порівняно з попередніми системами.

Крім основних одиниць, у системі СІ є позасистемні (додаткові) одиниці для вимірювання плоского і тілесного кутів – радіан і стерадіан відповідно, а також велика кількість похідних одиниць простору і часу, механічних величин, електричних і магнітних величин, теплових, світлових та акустичних величин, а також іонізуючих випромінювань.

Після прийняття Міжнародної системи одиниць практично всі найкрупніші міжнародні організації включили її в свої рекомендації з метрології і закликали всіх країн – членів цих організацій – прийняти її.

Основні одиниці системи СІ зі скороченими позначеннями українськими та латинськими літерами наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Основні одиниці системи СІ [2]

№ п/п	Величина	Одиниця вимірювання	Скорочене позначення одиниці	
			українське	міжнародне
1	Довжина	метр	м	m
2	Маса	кілограм	кг	kg
3	Час	секунда	с	s
4	Сила електричного струму	ампер	А	A
5	Термодинамічна температура	кельвін	К	K
6	Сила світла	кандела	кд	cd
7	Кількість речовин	моль	моль	mol

Позасистемні одиниці. Поряд з основними та похідними одиницями Міжнародної системи СІ існують ще позасистемні одиниці (табл. 2.2), які не входили до складу жодної із систем – так звані позасистемні одиниці. Значного поширення набули одиниці тиску: *атмосфера, бар, міліметр ртутного стовпа, міліметр водяного стовпа.*

Позасистемними одиницями є хвилина, година; одиницями довжини – ангстрем, світловий рік, парсек; одиницями площі – ар, гектар; одиницями електричної енергії – електрон-вольт, кіловат-година; одиницями акустичних величин – децибел, фон, октава та ін. Практичне застосування тих чи інших позасистемних одиниць вибирається для спрощення реальних вимірювань.

**Позасистемні одиниці, які допущені до застосування на рівні з
одиницями системи СІ**

Назва величини	Одиниця			Співвідношення із одиницями Сі	Примітка
	Назва	Позначення			
		Українська	Міжнародна		
час	хвилина	хв	min	1хв = 60с	не допустиме використання з префіксами
	година	год	h	1год = 60хв = 3600с	
	доба	д	d	1д = 24год	
маса	тонна	т	t	1т = 1000кг	значення атомної одиниці маси визначається експериментально
	центнер	ц	z	1ц = 100кг	
	уніфікована атомна одиниця маси	а.о.м.	u	а.о.м. = $1,66054 \times 10^{-27}$	
об'єм, місткість	літр	л	l	1л = 1дм ³ = 10 ⁻² м ³	літр є спеціальною назвою кубічного дециметра
енергія	електрон-вольт	еВ	eV	1еВ = 1,602177 × 10 ⁻¹⁹ Дж	значення електрон-вольта визначено експериментально
площинний кут	градус	–		1 ⁰ = (π/180) рад	
	хвилина	–		1' = (1/60 ⁰) = (1π/10800) рад	
	секунда	с		1'' = (1/60') = (π/648000) рад	

Існує також застосування одиниць часу: тиждень, місяць, рік тощо, проте їх визначення часто потребує уточнення. Не рекомендується застосовувати при точних вимірюваннях.

Однак при уніфікації одиниць й ухваленні єдиної системи одиниць кількість позасистемних одиниць повинна бути скорочена до мінімуму. До того ж багато позасистемних одиниць є кратними системі СІ і можуть використовуватися для практичних вимірювань (тонна, міліметр, мікрон та ін.) Вони широко застосовуються в повсякденному житті.

Крім названих, існують ще позасистемні одиниці тимчасового використання (морська миля, яка дорівнює 1852 м; кабельтов – 182,5 м;

гектар – 10 000 м²; ар – 100 м², бар – 105 Па, карат – 0,2 г; бушель – 36,3687 дм³ та ін.), а також відносні та логарифмічні величини.

Кратні і часткові одиниці. Найпрогресивнішим способом утворення кратних і часткових одиниць у метричній системі мір є десяткова кратність між великими і малими одиницям. Десяткові кратні і часткові одиниці від одиниць СІ утворюються шляхом використання множників і приставок від 10²⁴ до 10⁻²⁴ (табл. 2.3).

Таблиця 2.3.

Множники та приставки для утворення кратних і часткових одиниць

Множник	Приставка		
	Назва	Позначення	
		українське	міжнародне
10000000000000000000000000=10 ²⁴	йота	З	Y
1000000000000000000000000=10 ²¹	зета	Й	Z
1000000000000000000000000=10 ¹⁸	екса	У	E
100000000000000000000000=10 ¹⁵	пета	П	P
10000000000000000000000=10 ¹²	тера	Т	T
1000000000=10 ⁹	гіга	Г	G
1000000=10 ⁶	мега	М	M
1000=10 ³	кіло	К	k
100=10 ²	гекто	Г	h
10=10 ¹	дека	да	da
0,1=10 ⁻¹	деци	д	d
0,01=10 ⁻²	санті	е	e
0,001=10 ⁻³	мілі	м	m
0,000001=10 ⁻⁶	мікро	мк	μ
0,000000001=10 ⁻⁹	нано	н	n
0,000000000001=10 ⁻¹²	піко	п	p
0,0000000000000001=10 ⁻¹⁵	фемто	ф	f
0,00000000000000000001=10 ⁻¹⁸	атто	а	a
0,000000000000000000000001=10 ⁻²¹	зенто	Зн	z
0,00000000000000000000000001=10 ⁻²⁴	йокто	й	y

Запитання для самоконтролю до теми 2

1. Які системи фізичних величин Ви знаєте? Назвіть їх недоліки та переваги.
2. Що таке фізична величина?
3. Наведіть класифікації фізичних величин.
4. Яка основна одиниця вимірювання маси?
5. Яка основна одиниця вимірювання часу?
6. Яка основна одиниця вимірювання температури?
7. Яка основна одиниця вимірювання світла?
8. Яка основна одиниця вимірювання довжини?
9. Наведіть приклади похідних одиниць фізичних величин.
10. Які множники та приставки до назви основних одиниць фізичних величин Ви знаєте? Поясніть відповідь.

Тема 3. Технічні вимірювання

План

- 3.1. Основні поняття про вимірювання. Забезпечення єдності вимірів
- 3.2. Види вимірювань
- 3.3. Методи вимірювань
- 3.4. Класифікація засобів вимірювальної техніки
- 3.5. Метрологічні показники засобів вимірювання
- 3.6. Калібрування засобів вимірювальної техніки
- 3.7. Еталони як засіб вимірювання
- 3.8. Перспективи розвитку еталонів

3.1. Основні поняття про вимірювання. Забезпечення єдності вимірів

Вимірювання є одним із шляхів пізнання природи людиною, що поєднує теорію з практичною діяльністю людини. Вони є основою наукових знань, служать для обліку матеріальних ресурсів, забезпечення потрібної якості продукції, взаємозамінності деталей і вузлів, вдосконалення технології, автоматизації виробництва, стандартизації, охорони здоров'я і забезпечення безпеки праці і для багатьох інших галузей людської діяльності. Вимірювання кількісно характеризують оточуючий матеріальний світ, розкриваючи діючі в природі закономірності.

Про це дуже образно сказав Дмитро Іванович Менделєєв, що «...наука починається з тих пір, як починають вимірювати». Відомим є аналогічне висловлювання й основоположника англійської метрології Томсона, що кожна річ відома лише тією мірою, якою її можна виміряти. З цим перегукується і думка відомого вченого у сфері Б.Я. Якобі, сформульована понад 100 років назад: «...мистецтво вимірювання є потужною зброєю, створеною людським розумом для проникнення в закони природи і підкорення її сил нашому пануванню».

Отже під вимірювальною технікою в широкому значенні цих слів розуміють як усі технічні засоби, за допомогою яких виконують вимірювання, так і техніку проведення вимірювань. У всьому світі щоденно здійснюються сотні, тисячі мільярдів вимірювань. В інтересах кожної країни, у взаєминах між країнами необхідно, щоб результати вимірювань однакових

величин, які отримані в різних місцях і за допомогою різних вимірювальних засобів, були б відтворені на рівні потрібної точності.

У першу чергу, для цього необхідна одноманітність одиниць фізичних величин і мір, що здійснюють речовинне їх відтворення. Забезпечення високого ступеня одноманітності засобів вимірювання є однією з умов забезпечення відтворюваності результатів вимірювань.

Питаннями теорії та практики, а саме, забезпеченням однаковості вимірювань займається метрологія.

Метрологія – наука про вимірювання, про методи і засоби, забезпечення їх однаковості, про способи досягнення потрібної точності.

Метрологія служить теоретичною основою вимірювальної техніки. І чим більше розвивається вимірювальна техніка, тим більшого значення набуває метрологія, яка створює і вдосконалює теоретичні основи вимірювань, узагальнює практичний досвід у галузі вимірювань і спрямовує розвиток вимірювальної техніки.

Вимірювання – це знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірюванням ще називають пізнавальний процес, у якому спеціальним засобом є величина об'єкта вимірювання.

Для того щоб дізнатися результат обробки деталі, визначити, який при цьому отримано розмір і чи відповідає він вимогам креслення, необхідно виміряти цю деталь (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Вимірювання деталі штангенциркулем після обробки

Вимірювати люди почали здавна, і з кожним роком значення вимірювань підвищувалося. Людство далеко пішло в техніці вимірювання. Користуючись сучасними методами, вчені точно вимірюють властивості речей і явищ. Ці вимірювання є одним із засобів опанування природою,

підкорення її нашим потребам. Старі засоби вимірювань (палиця, тінь, мотузка, камінь – рис. 3.2) замінилися новими.



Рис. 3.2 Старі засоби вимірювань

Засіб, за допомогою якого виконують вимірювання, так і називають – засіб вимірювання, він має нормовані метрологічні властивості.

Значення величини, яке виявили вимірюванням, називають *результатом* вимірювання.

Засоби вимірювання – це пристрої, здатні у процесі вимірювання виявити числове значення величини вимірюваного розміру. Засоби вимірювання здавна прийнято поділяти на три основні види: міри, вимірювальні інструменти й вимірювальні пристрої.

1. Міри – це засоби вимірювання, речовинно відтворюючі фізичну величину заданого розміру. Міри поділяють на однозначні і багатозначні. Однозначна міра відтворює величину одного розміру.

Наприклад, плоскопаралельна міра довжини 10 мм (рис. 3.3) відтворює один лінійний розмір між її площинами, що дорівнює 10 мм; кутова міра – кутова плитка 15° (рис. 3.4) відтворює один кутовий розмір між площинами, який становить 15° .

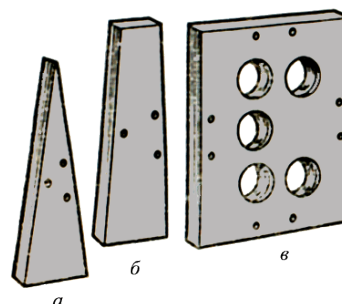
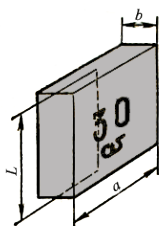


Рис. 3.3. Кінцева міра довжини.
Номінальна довжина КМД: a – довжина основи; b – ширина основи

Рис. 3.4. Кутові міри-плитки: a – з гострою вершиною; $б$ – зі зрізаною вершиною; $в$ – чотирикутна плитка

Багатозначна міра відтворює ряд однойменних величин різного розміру. Наприклад, лінійка зразкова відтворює своїми поділками багато

лінійних розмірів на своїй шкалі. Кутовий лімб відтворює багато кутових розмірів на своїй шкалі.

Отже, міра відтворює величини, значення яких пов'язані з прийнятою одиницею цієї величини певним відомим співвідношенням.

2. Вимірювальні інструменти й вимірювальні пристрої – це засоби вимірювання, здатні виробляти показання – числову вимірювальну інформацію – у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Ці показання виробляються у прийнятих одиницях вимірювання.

Спочатку одиниці фізичних величин обиралися довільно, без певного зв'язку одна з одною, що спричиняло великі труднощі. Значну кількість довільних одиниць однієї і тієї самої величини ускладнювало порівняння результатів вимірювань, здійснених різними спостерігачами.

У кожній країні, а іноді навіть у кожному місті створювалися свої одиниці. Переведення одних одиниць в інші було дуже складним і призводило до істотного зниження точності результатів вимірювань.

Окрім зазначеного розмаїття одиниць, яке можна назвати «територіальним», існувало розмаїття одиниць, застосовуваних у різних галузях науки, техніки, промисловості тощо.

Наявність низки систем одиниць вимірювання фізичних величин і велика кількість позасистемних одиниць, незручності, які виникають на практиці у зв'язку з перерахунками під час переходу від однієї системи до іншої, викликали необхідність створення єдиної універсальної системи одиниць, яка б охоплювала всі галузі науки і техніки і була б прийнята в міжнародному масштабі.

Міжнародна організація зі стандартизації (ІСО) прийняла у своїх рекомендаціях з одиниць Міжнародну систему одиниць. Організація об'єднаних націй з освіти, науки і культури (ЮНЕСКО) закликала всі країни – члени організації – прийняти Міжнародну систему одиниць.

Міжнародна організація законодавчої метрології (МОЗМ) рекомендувала державам – членам організації – ввести Міжнародну систему одиниць у законодавчому порядку і градувати в одиницях СІ всі вимірювальні пристрої.

Міжнародна система одиниць увійшла в рекомендації з одиниць Міжнародної спілки чистої та прикладної фізики, Міжнародної електротехнічної комісії, Міжнародної газової спілки й інших міжнародних організацій.

3. Первинні засоби вимірювань. Лінійка вимірювальна металева.

Лінійка вимірювальна являє собою гнучку сталю стрічку з нанесеною на ній прямою шкалою з ціною поділки 1 мм. Лінійки виготовляють зі шкалами від 0 до 150 мм, від 0 до 300 мм, від 0 до 500 мм і від 0 до 1000 мм. Початком шкали лінійки є площина торця стрічки; торець розташований перпендикулярно поздовжньому ребру стрічки. З торцем збігається середина нульового штриха шкали. Кінець штрихів шкали виходить на поздовжнє ребро. Кожний 5-й і 10-й штрих шкали подовжений, кожний 10-й – із цифрою, яка показує відстань у сантиметрах від цього штриха до початку шкали. Другий кінець стрічки закруглений і має отвір для підвішування лінійки.

Металева лінійка дозволяє безпосередньо здобути значення вимірюваної величини. На рис. 3.5 показано прийоми визначення міжосьової відстані отворів. Якщо отвори однакового діаметра (рис. 3.5, а), то можна виміряти лінійкою відстань mn , яка дорівнює міжосьовій відстані.

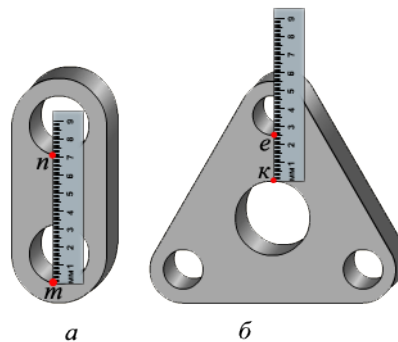


Рис. 3.5. Прийоми вимірювань металевою лінійкою

У разі різних діаметрів отворів (рис. 3.5, б) лінійкою вимірюється відстань ek між найближчими точками отворів і до неї додається сума розмірів радіусів великого й малого отворів.

Кронциркуль. Кронциркуль служить для вимірювання розмірів зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей (рис. 3.6, 3.7).



Рис. 3.6. Вимірювання зовнішніх розмірів деталі кронциркулем



Рис. 3.7. Вимірювання внутрішніх розмірів деталі кронциркулем

Криволінійна форма ніжок із загнутими всередину кінцями дозволяє зручно вимірювати діаметри поверхонь обертання (рис. 3.8, б).

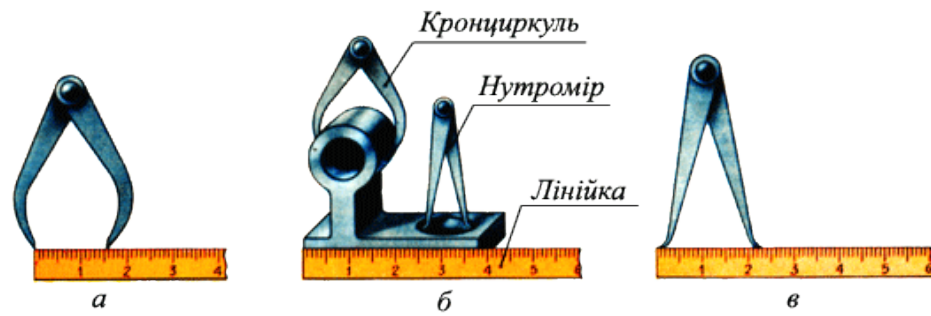


Рис. 3.8. Прийоми вимірювань кронциркулем і нутроміром

Нутромір. Нутромір застосовують переважно для вимірювання розмірів внутрішніх поверхонь. Ніжки нутроміра прямі з відігнутими зовні кінцями (рис. 3.8, б, в).

При користуванні кронциркулем і нутроміром у жодному разі не виконувати вимірювання із зусиллям: інструмент має проходити вимірювані місця вільно під дією власної ваги. На рис. 3.8, б показано вимірювання кронциркулем діаметра циліндричної частини деталі, а нутроміром – діаметра отвору в основі цієї деталі. Лінійкою визначають розміри основи деталі. Значення виміряних кронциркулем і нутроміром величин визначають шляхом перенесення їх на лінійку (рис. 3.8, а, в).

Вимірювання деталей кронциркулем, нутроміром і лінійкою не дають великої точності. Точність вимірювання цими інструментами при певному досвіді сягає 0,5 мм (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Читання показань при вимірюванні кронциркулем

Багато деталей мають криволінійні обриси. У таких випадках форму і розміри контуру цих деталей можна визначити вимірюванням координат його точок за допомогою *рейсмуса*. Під час вимірювання координат точок рейсмус і вимірювану деталь установлюють на гладкій рівній поверхні (розмічальній плиті). Пересуваючи стрижень рейсмуса по лінійці вгору або

донизу і приводячи його гострий кінець у зіткнення з якоюсь точкою кривої, можна визначити координати цієї точки. Узявши за початок координат нульову поділку лінійки –рейсмуса, можна за її шкалою знайти координати B_1, B_2, B_3 , а за шкалою стрижня – координати A_1, A_2, A_3 . Точніше координати точок можуть бути визначені за допомогою *штангенрейсмуса*, який обладнаний ноніусом (рис. 3.10).

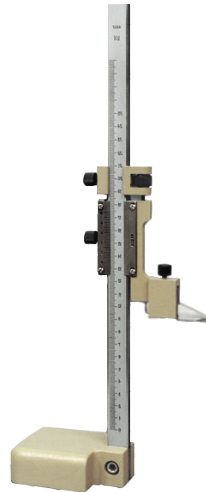


Рис. 3.10. Штангенрейсмус

Штангенциркуль ШЦ –1 (рис. 3.11, *а*). Штангенциркулем називають засіб для вимірювання лінійних розмірів, заснований на штанзі 3, на якій нанесено шкалу з ціною поділки 1 мм. Штангою 3 пересувається рамка 6 із допоміжною шкалою –ноніусом 5. Штангенциркуль обладнаний губками для зовнішніх вимірювань 7 і для внутрішніх вимірювань 1, а також затиском 2. До рамки 6 прикріплено лінійку глибиноміра 4.

Ноніус 5 (рис. 3.11, *б*) служить допоміжною шкалою, яка дозволяє відлічувати частки поділки шкали штанги. Він наноситься на скошеній поверхні рамки або від подільної пластинки, закріпленої у вікні рамки.

Ноніус має десять рівних поділок 9 мм, тобто кожна поділка ноніуса менше поділки штанги на 0,1 мм. При зіткнутих губках нульові поділки штанги і ноніуса збігаються.

При вимірюванні зовнішнього діаметра циліндричної деталі (рис. 3.11) вона дещо затискається губками 7, рамка з ноніусом закріплюється на шкалі гвинтом 2, а за шкалами штанги і ноніуса виконується обчислення.

При діаметрі деталі, що дорівнює 18 мм, нульова поділка ноніуса точно збігається з вісімнадцятою поділкою штанги (рис. 3.11, *б*).

Якщо діаметр деталі дорівнює 18,2 мм, то нульову поділку ноніуса буде зсунуто вправо від вісімнадцятої поділки штанги на 0,2 мм, а отже,

друга поділка ноніуса збігається із двадцятотою поділкою штанги (рис. 3.11, в). При величині діаметра деталі 18,4 мм четверта поділка збігається з двадцять другою поділкою штанги (рис. 3.11, г).

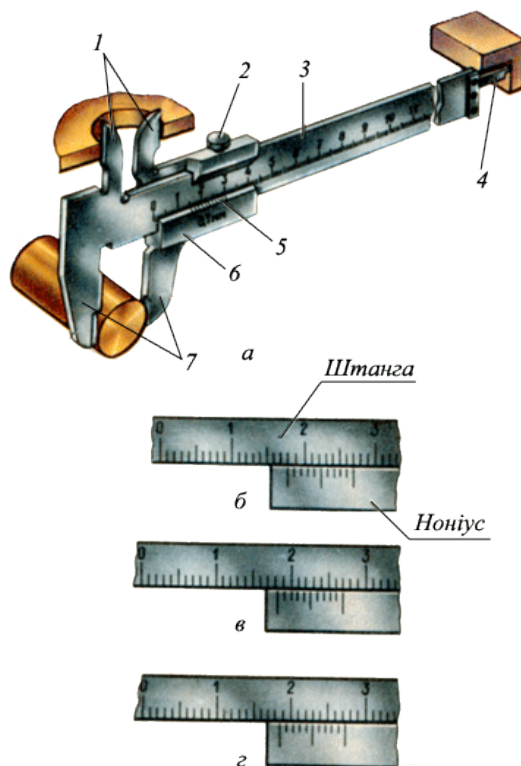


Рис. 3.11. – Штангенциркуль ШЦ –1: а – вимірювання елементів деталей штангенциркулем ШЦ –1; б – розмір вимірювальної величини 18 мм; в – розмір вимірювальної величини 18,2 мм; г – розмір вимірювальної величини 18,4 мм; 1 – губки для внутрішніх вимірювань; 2 – затиск; 3 – штанга; 4 – лінійка глибиноміра; 5 – шкала –ноніус; 6 – рамка; 7 – губки для зовнішніх вимірювань

Ноніус 5 (рис. 3.11, б) служить допоміжною шкалою, яка дозволяє відлічувати частки поділки шкали штанги. Він наноситься на скошеній поверхні рамки або від подільної пластинки, закріпленої у вікні рамки.

Ноніус має десять рівних поділок 9 мм, тобто кожна поділка ноніуса менше поділки штанги на 0,1 мм. При зіткнутих губках нульові поділки штанги і ноніуса збігаються.

При вимірюванні зовнішнього діаметра циліндричної деталі (рис. 3.11) вона дещо затискається губками 7, рамка з ноніусом закріплюється на шкалі гвинтом 2, а за шкалами штанги і ноніуса виконується обчислення.

При діаметрі деталі, що дорівнює 18 мм, нульова поділка ноніуса точно збігається з вісімнадцятою поділкою штанги (рис. 3.11, б).

Якщо діаметр деталі дорівнює 18,2 мм, то нульову поділку ноніуса буде зсунуто вправо від вісімнадцятої поділки штанги на 0,2 мм, а отже,

друга поділка ноніуса збігається із двадцятотою поділкою штанги (рис. 3.11, в). При величині діаметра деталі 18,4 мм четверта поділка збігається з двадцять другою поділкою штанги (рис. 3.11, г).

Таким чином, щоб установити розмір вимірюваної величини, необхідно визначити за лінійкою штанги ціле число міліметрів, а за ноніусом число десятих часток міліметрів. Десятих часток міліметрів буде стільки, скільки можна відрахувати поділок ноніуса від його нульового штриха до його найближчого штриха, що збігається з яким –небудь штрихом штанги (рис. 3.12). Вимірювання діаметра отвору виконується за допомогою вимірювальних губок 1 (рис. 3.11 – 3.13).



Рис. 3.12. Розмір, отриманий при вимірюванні штангенциркулем, дорівнює 67,18 мм



Рис. 3.13. Вимірювання отвору деталі

У пазу зі зворотного боку штанги 3 розташована вузька лінійка глибиноміра 4, жорстко з'єднана з рамкою 6. При зімкнутому положенні губок торець глибиноміра збігається з торцем штанги. При вимірюванні глибини отвору або уступу в деталі торець штанги упирається в торець деталі, а глибиномір за допомогою рамки пересувається до упору в дно отвору або границю уступу. Розмір виміряної глибини визначається за поділками штанги і ноніуса (рис. 3.14).



Рис. 3.14. Вимірювання розміру глибини деталі

Мікрометр гладкий (рис. 3.15). Основою мікрометра є скоба 1, а передавальним (перетворювальним) пристроєм служить гвинтова пара, що складається з мікрометричного гвинта 3 і мікрометричної гайки, закріпленої всередині стебла 5, які часто називають мікропарою. У скобу 1 запресовані п'ятка 2 і стебло 5. Вимірювана деталь охоплюється вимірювальними поверхнями мікрогвинта 3 і п'ятки 2. Барабан 6 приєднаний до мікрогвинта 3 корпусом тріскачки 7. Для наближення мікрогвинта 3 до п'ятки 2 його обертають за барабан або за тріскачку 8 за годинниковою стрілкою (від себе), а для видалення мікрогвинта від п'ятки його обертають проти годинникової стрілки (на себе). Закріплюють мікрогвинт у потрібному положенні стопором 4.

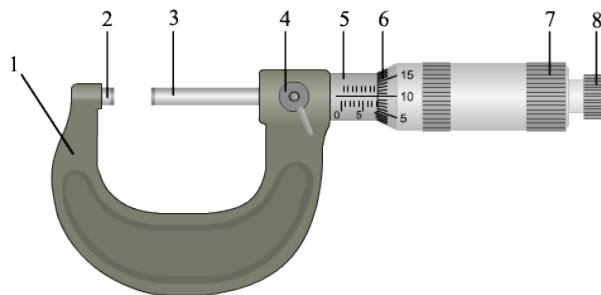


Рис. 3.15. Мікрометр гладкий: 1 – скоба; 2 – п'ятка; 3 – мікрометричний гвинт; 4 – стопор; 5 – стебло; 6 – барабан; 7 – корпус тріскачки; 8 – тріскачка

При щільному зіткненні вимірювальних поверхонь мікрометра з поверхнею вимірюваної деталі тріскачка прокручується з легким тріском, при цьому обмежується вимірювальне зусилля мікрометра. Результат вимірювання розміру мікрометром відраховується як сума відліків за шкалою стебла 5 і барабана 6.

Слід пам'ятати, що ціна поділки шкали стебла становить 0,5 мм, а шкали барабана – 0,01 мм. Крок різі мікропари (мікрогвинт і мікрогайка) $P = 0,5$ мм.

Кількість поділок барабана – 50. Якщо зрушити барабан на одну поділку його шкали, то торець мікрогвинта переміститься відносно п'ятки на 0,01 мм, оскільки $0,5 \text{ мм} : 50 = 0,01 \text{ мм}$.

Показання за шкалами гладкого мікрометра відлічують у такому порядку: спочатку за шкалою стебла 5 читають значення штриха, найближчого до торця скоса барабана 6 (на рис. 4.16 – це число 15,00 мм). Далі за шкалою барабана читають значення штриха, найближчого до поздовжнього штриха стебла (на рис. 3.16 – це число 0,20 мм). Додавши обидва значення, отримують показання мікрометра (на рис. 3.16 – це значення 15,20 мм).

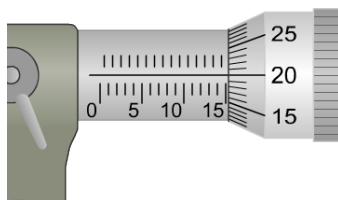


Рис. 3.16. Відлік показань за шкалами гладкого мікрометра

Діапазони вимірювання гладкого мікрометра: від 0...25 мм; 25...50 мм тощо до 275...300 мм, далі 300...400; 400...500 і 500...600 мм.

До мікрометрів із нижньою границею понад 25 мм додають встановлювальні міри для перевірки нульового положення. Мікрометри з верхньою границею понад 300 мм мають змінну або пересувну п'ятку для збільшення діапазону вимірювань до 50 мм (рис. 3.17).



Рис. 3.17. Мікрометри типу МК

Для підвищення зручності і прискорення відліку показання мікрометра випускаються накладні пристрої з точністю 0,01 мм, такі як комбінований мікрометр гладкий (дюйм/метр) із цифровою індикацією й електронний мікрометр з комп'ютером і принтером (рис. 3.18).

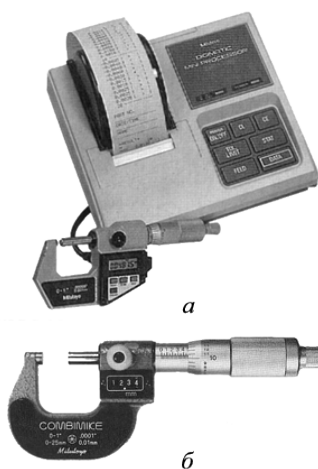


Рис. 3.18. Накладні пристрої для вимірювань із точністю 0,01 мм: а – електронний мікрометр з принтером; б – комбінований мікрометр гладкий з цифровою індикацією

Індикатор годинникового типу. Індикатор годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм з пересуванням вимірювального стрижня паралельно шкалі призначений для відносних вимірювань зовнішніх розмірів, відхилень форми і розташування поверхонь (рис. 3.19). Він є також показуючим пристроєм індикаторної скоби, індикаторного глибиноміра й індикаторного нутроміра. На лицьовому боці циферблата індикатора є дві стрілки і дві шкали; велика стрілка 1 над оцифрованою круговою шкалою 2 і мала стрілка 4 над відліковою шкалою 5. Кругова шкала має ціну поділки 0,01 мм, а мала шкала – 1 мм. Пересування вимірювального стрижня 6 на 1 мм викликає поворот стрілки 1 на 100 поділок (один повний оберт), а стрілки 4 на одну поділку. Шкала 2 індикатора разом із обідком при установці шкали на нульову поділку повертається відносно великої стрілки 1 і фіксується стопором 3.

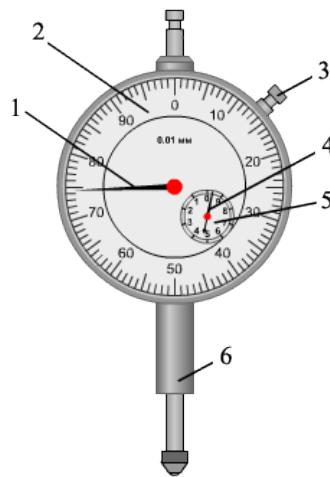


Рис. 3.19. Індикатор годинникового типу: 1 – велика стрілка; 2 – шкала індикатора; 3 – стопор; 4 – стрілка; 5 – відлікова шкала; 6 – вимірювальний стрижень

Конструкція індикатора годинникового типу являє собою вимірювальну головку з поздовжнім пересуванням наконечника (рис. 3.20). Основою індикатора є корпус, усередині якого змонтовано перетворювальний механізм – рейково–зубчаста передача. Крізь корпус проходить вимірювальний стрижень 2 із наконечником 1. На стрижні нарізано рейку. Рухи вимірювального стрижня – рейки 2 передаються зубчастими колесами – рейковим 8, передавальним 6 і трибкою 4 основній стрілці 5, величина повороту якої відлічується за круглою шкалою – циферблатом. Для установки на «0» круга шкала повертається обідком.

Кругла шкала індикатора годинникового типу складається зі 100 поділок, ціна кожної поділки – 0,01 мм. Це означає, що при пересуванні

вимірювального наконечника на 0,01 мм стрілка індикатора перейде на одну поділку шкали.

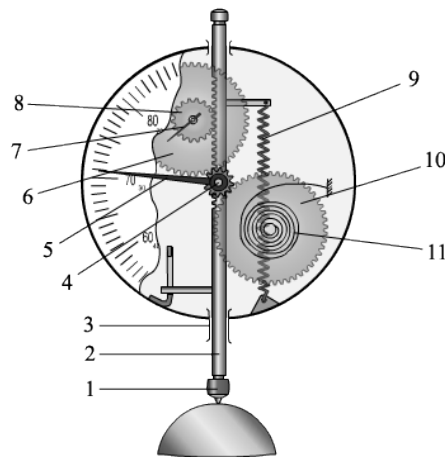


Рис. 3.20. – Пристрій індикатора годинникового типу: 1 – наконечник; 2 – вимірювальний стрижень – рейка; 3 – гільза; 4 – трибка; 5 – стрілка; 6 – передавальне зубчасте колесо; 7 – стрілка; 8 – зубчасте рейкове колесо; 9 – пружина; 10 – зубчасте колесо; 11 – пружинний волосок

Загальна структура засобів вимірювань. Конструкція переважної більшості засобів вимірювання складається з послідовно розташованих елементів і пристроїв, кожен з яких у цій послідовності виконує певне завдання під час вимірювання. Для того щоб у подальшому у процесі вивчення засобів вимірювання було легше уявити їх дію, розглянемо стисло ці пристрої та їх призначення (ГОСТ 16263–70).

Основа вимірювального засобу – це конструктивний елемент, на базі якого змонтовано всі елементи даного діючого засобу вимірювання.

Наприклад, штанга штангенциркуля (рис. 3.21), скоба мікрометра (рис. 3.22), корпус індикатора годинникового типу (рис.3.23).



Рис.3.21. Штанга штангенциркуля

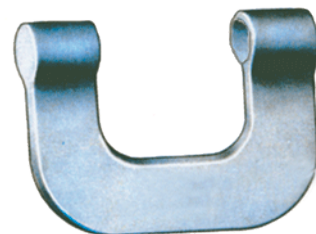


Рис. 3.22. Скоба мікрометра

Сприймальний елемент – це частина засобу вимірювання, яка здійснює його зіткнення з об'єктом вимірювання і сприймає величину цього об'єкта, наприклад, вимірювальні губки штангенциркуля, вимірювальний наконечник

індикатора (рис. 3.24). Частину сприймального елемента, яка безпосередньо торкається поверхні об'єкта, іноді називають чутливим елементом (рис. 3.25).

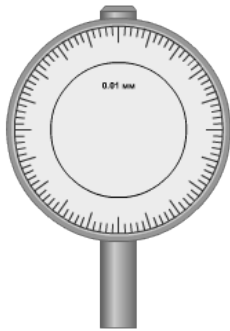


Рис. 3.23. Корпус індикатора годинникового типу



Рис. 3.24. Вимірювальний наконечник індикатора



Рис. 3.25. Сприймальний елемент індикатора

Розмірний елемент – це одна із деталей засобу вимірювання, яка має власний точний, зазвичай багатозначний, розмір, із величиною якого у процесі вимірювання безпосередньо зіставляється сприйнята засобом вимірювання величина об'єкта вимірювання (наприклад штанга зі шкалою штангенциркуля).

Перетворювальний пристрій – це внутрішній механізм або елемент засобу вимірювання, який перетворює (видозмінює) малі пересування, сприйняті від об'єкта вимірювання, у великі пересування на відліковому пристрої так, що ці великі пересування виконувач може безпосередньо спостерігати і відлічувати (наприклад зубчаста передача в індикаторі годинникового типу, див. рис. 3.20).

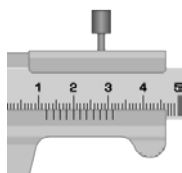


Рис. 3.26. Ноніус штангенциркуля

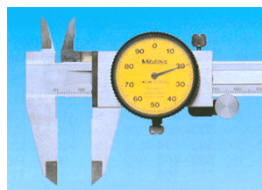


Рис. 3.27. Шкала індикатора і стрілка



Рис. 3.28. Цифрове табло пристрою

Відліковий пристрій створює можливість відлічувати показання засобу вимірювання, у більшості випадків відлікові пристрої мають шкалу і

показчик, яким служить окремих штрих, група штрихів або стрілка. Упродовж останнього часу поширюються засоби вимірювання з цифровими відліковими пристроями, наприклад, ноніус штангенциркуля (рис. 3.26), кругла шкала індикатора і стрілка (рис. 3.27), цифрове табло пристрою з цифровою індикацією (рис. 3.28).

Залежно від призначення і принципу дії конкретного засобу вимірювання в його конструкції використовуються ті чи інші комплекси цих пристроїв і елементів, які складають структуру цього засобу вимірювання.

4. Параметри і характеристики засобів вимірювання. *Шкала* – це ряд позначок (штрихів або точок) і проставлених біля них чисел, положення і значення яких відповідає ряду послідовних розмірів. *Довжина (інтервал) поділки шкали* – відстань між серединами (осями) двох сусідніх позначок шкали, найпоширеніші інтервали – 0,5 і 1 мм.

Ціна поділки шкали – це різниця значень величин, відповідних двом сусіднім позначкам шкали. Іншими словами, це величина пересування сприймального пристрою засобу вимірювання, яке викликає пересування показчика на одну поділку шкали. Найпоширеніші ціни поділок – 0,1; 0,2; 0,5 мкм; 1; 2; 5 мкм; 0,01; 1 мм.

Приклад. Якщо наконечник індикатора годинникового типу перемістити на 0,01 мм, то стрілка зсунеться на одну поділку кругової шкали, отже, ціна поділки складає 0,01 мм (рис. 3.29).



Рис. 3.29. Показання індикатора під час вимірювань

Показання засобу вимірювання – це значення величини, визначене за відліковим пристроєм після вимірювання заданого об'єкта. Показання завжди складається з добутку числа поділок шкали і відліку і ціни поділки даної шкали.

Приклад 1. Потрібно виміряти діаметр вала штангенциркулем. Для цього охоплюємо губками для зовнішніх вимірювань вимірюваний вал і читаємо за шкалою і ноніусом показання 25,3 мм.

Приклад 2. Потрібно виміряти відхилення від паралельності поверхонь пластини індикатором. Для цього укладаємо пластину на столик, підводимо до неї наконечник, зсуваємо пластину до одного краю і ставимо стрілку на «0». Далі зсуваємо пластину до іншого краю і читаємо за шкалою нове положення стрілки. Якщо стрілка зсунулася на 10 поділок шкали, то показання індикатора – непаралельність поверхонь пластини – дорівнює 0,1 мм, оскільки ціна поділки шкали $c = 0,01$ мм. Тут «0» і «10» – відліки, а 0,10 мм – показання.

Діапазон показань – це область значень вимірюваного розміру, які можуть бути відлічені за даною шкалою.

Границі вимірювань даним засобом вимірювання – найбільший і найменший розміри, які можуть бути виміряні з нормованою точністю.

Діапазон вимірювань даним засобом вимірювання – це область, у якій розташовані вимірювані розміри.

Єдність вимірів – одна із функцій державного управління, оскільки є обов'язковою передумовою ефективного господарювання, торгівлі, раціонального використання ресурсів, наукової та інших видів діяльності, а також безпечності продукції для життя та здоров'я людей, сумісності, взаємозамінності, охорони навколишнього середовища.

Регулювання відносин в області забезпечення єдності вимірів здійснюється відповідно до національного законодавства держав – учасників співдружності. Міжпарламентська Асамблея держав – учасників співдружності, керуючись рішеннями Генеральної Асамблеї, прийняла Закон про забезпечення єдності вимірів як рекомендаційний документ в області забезпечення єдності вимірів у всіх державах – учасниках співдружності. Якщо міжнародним договором (згідно із Законом про забезпечення єдності вимірів, стаття 3) встановлені інші правила, ніж ті, котрі утримуються в національному законодавстві в області забезпечення єдності вимірів, то застосовуються правила міжнародного договору.

Єдність вимірів є характеристикою якості вимірів, яка полягає в тому, що результати виражаються в законних одиницях, розміри яких дорівнюють розмірам відтворених величин, а похибки результатів вимірів відомі з заданою ймовірністю та не виходять за встановлені межі.

Єдність вимірів – це стан вимірювань, за якого їх результати виражено в прийнятих одиницях, і похибки вимірювань, які відомі з заданою ймовірністю.

Єдність вимірювань необхідна для того, щоб можна було порівнювати результати вимірювань, які виконано в різних місцях, у різний час, з використанням різних методів та засобів вимірювання (ЗВ).

Державне керування (Стаття 4 Закону «Про забезпечення єдності вимірів») діяльністю із забезпечення єдності вимірів здійснює національний орган з метрології (НОМ). НОМ затверджує нормативні документи із забезпечення єдності вимірів, що встановлюють метро-логічні правила і норми та підлягають обов'язковому застосуванню на території держави. Єдність вимірювань забезпечується системою стандартів державної системи вимірювань ДСТУ 2681, ДСТУ 2682, ДСТУ 3231, ДСТУ 3214 тощо.

Основні терміни і їх визначення. Основні визначення термінів наведені в Декреті Кабінету Міністрів про забезпечення єдності вимірювань (Ст. 1) та в ДСТУ 2681 –94 «Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення»:

- *державний еталон* – первинний або спеціальний еталон, офіційно затверджений як вихідний для країни;
- *ЗВ* – технічний засіб, що використовується для вимірювань і має нормовані метрологічні властивості;
- *калібрування ЗВ* – сукупність операцій, що виконуються з метою визначення дійсних значень метрологічних характеристик і придатності ЗВ до застосування;
- *повідка ЗВ* – визначення спеціально уповноваженим метро-логічним органом похибок ЗВ і встановлення їх придатності до застосування.

Залежно від рівня розвитку науково –технічного прогресу та рекомендацій Міжнародної організації законодавчої метрології, визначення цих термінів може уточнюватися Державним комітетом України зі стандартизації, метрології та сертифікації у нормативних документах на терміни і визначення.

3.2. Види вимірювань

На результати вимірювань впливає досить багато чинників: зовнішні умови, методи, технічні засоби вимірювання, стан експериментатора та ін. Зважаючи на численність різних чинників та умови проведення експерименту, вимірювання можна класифікувати за характером зміни вимірюваної величини в часі, за способом одержання числового значення, точністю та ін.

1. Основні поняття про вимірювання . Вимірювання є одним із важливих шляхів пізнання навколишнього середовища, зв'язків між подіями, закономірностей природи. Завдяки вимірюванням людство відкрило багато законів природи, що сприяло науково –технічному прогресу.

Вимірювання – це процес експериментального відшукування значень фізичної величини за допомогою спеціальних засобів вимірювання. Точні й вірогідні вимірювання фізичних величин, технологічних параметрів мають велике значення для науки, техніки та управління технологічними та тепловими процесами харчової промисловості.

Відповідно до стандарту ДСТУ 2681–94, вимірювання є відображенням вимірюваних величин, їх значень шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів.

Число, яке виражає відношення вимірюваної величини до одиниці вимірювання, називається числовим значенням вимірюваної величини. Воно може бути цілим або дробовим, але обов'язково абстрактним числом. Значення величини, прийняте за одиницю вимірювання, називається **розміром цієї одиниці**.

Якщо A – вимірювана величина, U – одиниця вимірювання, g – числове значення вимірюваної величини, то результат вимірювання A можна записати у вигляді такого рівняння:

$$A = gU \quad (3.1)$$

Формула 1 називається **основним рівнянням вимірювань**. Права частина рівняння називається результатом вимірювання і завжди має розмірність одиниці фізичної величини, а число g показує, скільки разів одиниця вимірювання U вміщується у вимірюваній величині. Тому при написанні результату вимірювання поряд з числовим значенням вимірюваної величини слід ставити позначення відповідної одиниці.

Наприклад: тиск $p = 10$ МПа, температура $T = 300$ К, довжина $L = 100$ м, струм $I = 30$ А. Цифрові значення відповідних вимірюваних величин є результатами вимірювань, а скорочені позначення при них – одиниці вимірюваних величин.

Якщо при вимірюванні величини A замість одиниці U взяти іншу одиницю – U_1 , то формула 1 матиме такий вигляд:

$$A = g_1 U_1 \quad (3.2)$$

Спільно розв'язуючи ці два рівняння, одержимо:

$$gU = g_1 U_1, \quad (3.3)$$

$$g1 = g(U/U1). \quad (3.4)$$

Із формули 3 видно, що для переходу від результату вимірювання g , вираженого в одиницях U , до результату $g1$, вираженого в одиницях $U1$, необхідно g помножити на співвідношення прийнятих одиниць.

У випадках, коли вимірювана величина не може вимірюватися у відповідних їй одиницях, використовується співвідношення між одиницями вимірюваної величини і одиницями іншої фізичної величини, яка однозначно пов'язана з першою величиною і зручніша для вимірювання. Наприклад, при вимірюванні температури за допомогою термометра опору шляхом визначення його електричного опору або використання у вимірювальній техніці перетворювачів, коли вимірюється значення сигналу, а не значення вимірюваної величини.

2. Класифікація вимірювань. На результати вимірювань впливає досить багато чинників: зовнішні умови, методи, технічні засоби вимірювання, стан експериментатора та ін. Зважаючи на численність різних чинників та умов проведення експерименту, вимірювання можна класифікувати за характером зміни вимірюваної величини в часі, за способом одержання числового значення, точністю та ін.

За характером зміни вимірюваної величини в часі вимірювання можна розділити на статичні та динамічні.

Статичні вимірювання – це вимірювання, при яких протягом певного проміжку часу вимірювана величина майже не змінюється або ж її значення змінюється поступово відповідно до процесу виробництва. Статичні вимірювання (рис. 3.30) використовуються, як правило, для встановлення взаємозв'язку між фізичними величинами одного і того самого об'єкта дослідження.

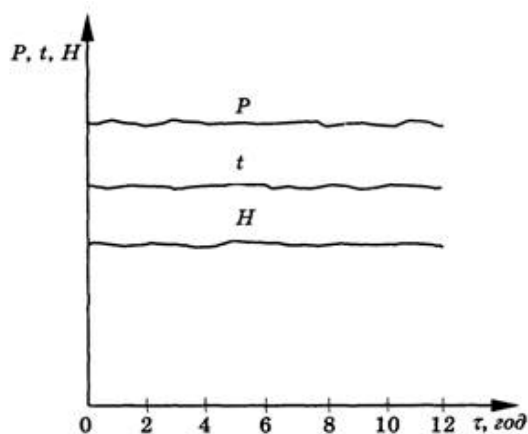


Рис. 3.30. Статичні характеристики вимірюваних величин – тиску, температури та рівня за проміжок часу τ

Вони застосовуються у пасивних експериментах і забезпечують задовільний рівень наочності при зміні вимірюваних величин за певний проміжок часу (годину, зміну, добу). Таким, наприклад, є проведення пасивного експерименту на випарній установці для вимірювання основних її параметрів: температури, рівня, тиску, витрати пари тощо.

Динамічні вимірювання – вимірювання, які показують зміну вимірюваної величини в часі при різних збуреннях, що впливають на об'єкт дослідження або ж на засіб вимірювання. Динамічні вимірювання дають можливість вивчати динамічні властивості об'єкта і засобів вимірювальної техніки, особливо первинних перетворювачів (датчиків).

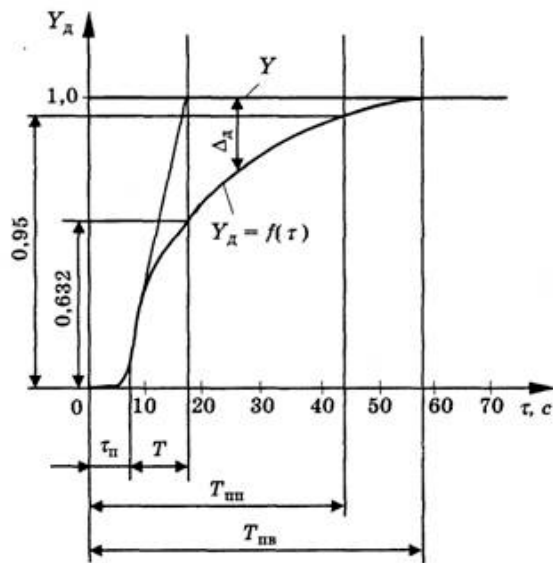


Рис. 3.31. Динамічна характеристика вимірюваної величини

На рис. 3.31 показано перехідний процес вимірюваної величини X_d у часі t при різкій зміні вимірюваної величини на вході приладу. Як видно з графіка, показання приладу U_d досягають сталого значення U лише через певний час і наближаються до нього поступово відповідно до експоненціального закону. Різниця між показаннями приладу U_d і дійсним значенням вимірюваної величини U називається *динамічною похибкою*: $\Delta_d = U - U_d$. На графіку (рис. 3.31) показані параметри, які характеризують динаміку процесу вимірювання.

Час початку реактування t_p – час від початку зміни вимірюваної величини на вході приладу до початку зміни показів приладу (значення вихідного сигналу).

Час переходного процесу T_{pp} – час, протягом якого показання приладу після початку зміни вхідної вимірюваної величини досягнуть значення з 5 – процентним відхиленням ($X_d = 0,95$).

Повний час встановлення значення вимірюваної величини $T_{пн}$ – час, протягом якого значення вимірюваної величини досягає свого сталого значення від початку зміни вхідної величини на вході приладу.

Постійна часу T – час, протягом якого вихідна вимірювана величина досягає 0,632 свого сталого значення на виході приладу, тобто це час перехідного процесу, який описується рівнянням експоненти.

У загальному випадку для опису лінійних вимірювальних засобів використовуються лінійні диференціальні рівняння. Якщо ж вимірювальний засіб має нелінійні елементи, то їх характеристики можна лінеаризувати, тобто звести до лінійних диференціальних рівнянь з припустимою і достатньою точністю. Це дає змогу використати лінійні диференціальні рівняння виду:

$$\begin{aligned} a_n(d^n y / d\tau^n) + a_{n-1}(d^{n-1} y / d\tau^{n-1}) + \dots + a_1(dy / d\tau) + a_0 y = \\ = b_m(d^m x / d\tau^m) + b_{m-1}(d^{m-1} x / d\tau^{m-1}) + \dots + b_1(dx / d\tau) + b_0 x. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Поряд з диференціальними рівняннями для опису динаміки перехідних процесів вимірювальних систем доцільно використовувати передаточні функції. Динамічні характеристики засобів вимірювання, які характеризують їх реакцію на гармонійні коливання у широкому діапазоні частот, називають частотними характеристиками, які містять в собі амплітудно – частотні та фазочастотні характеристики. Частотні характеристики можна одержати як експериментально, так і розрахунковим шляхом.

За способом одержання числового значення вимірюваної величини вимірювання поділяються на **прямі, посередні, сукупні та сумісні**.

Прямими називаються такі вимірювання, за яких значення вимірюваної величини визначається безпосередньо за експериментальними даними (вимірювання довжини метром, вимірювання температури термометром, тиску манометром та ін.). Прямі вимірювання найпростіші і найпоширеніші у промисловості.

Посередніми називаються такі вимірювання, за яких значення вимірюваної величини визначається за допомогою відомих математичних залежностей між цією величиною і величиною, яка визначається прямими вимірюваннями.

Наприклад: визначення об'єму рідини у циліндричній посудині за висотою рідини в ній та площею дна $S - V = Sh$; густини рідини за масою і її об'ємом – $\rho = m/V$ та ін.

У загальному вигляді вимірювана величина визначається за формулою

$$X = f(y_1, y_2, y_3, \dots), \quad (3.6)$$

де y_1, y_2, y_3 – значення величин, вимірюваних прямим способом;
 f – функціональна залежність.

При **сукупних** вимірюваннях числове значення вимірюваної величини визначається розв'язком системи рівнянь, одержаних шляхом сукупних прямих вимірювань однієї або декількох однойменних величин (наприклад, визначення температурного коефіцієнта лінійного розширення).

При **сумісних** вимірюваннях одночасно вимірюють дві або декілька різнойменних величин для виявлення залежностей між ними. Як правило, результати таких вимірювань використовуються у наукових дослідженнях.

Класифікацію видів вимірювань представлено на рис. 3.32.



Рис. 3.32. Класифікація видів вимірювань

За точністю вимірювання числових значень вимірюваної величини вимірювання поділяються на три групи.

1) Вимірювання з максимально можливою точністю відповідно до наявного технічного рівня. Це вимірювання за допомогою еталонів, спрямовані насамперед на відтворення встановлених одиниць фізичних

величин або ж фізичних констант. Крім того, такі вимірювання необхідні при наукових дослідженнях високого рівня та розробках сучасних технологій в електроніці, атомній енергетиці тощо.

2) Контрольно-повірочні вимірювання, похибки яких не перевищують деяких наперед заданих значень. До них відносять лабораторні вимірювання фізичних величин за допомогою зразкових і технічних засобів високих класів точності. Такі вимірювання проводяться у метрологічних лабораторіях Держстандарту України та науково –дослідних інститутах.

3) Технічні вимірювання – вимірювання, які проводяться у промисловості і визначаються невисоким класом точності засобів вимірювання.

Залежно від одиниць вимірювання значення вимірюваних величин можна розділити *на абсолютні, відносні та приведені*.

Абсолютними називаються вимірювання, значення яких подані у абсолютних одиницях фізичних величин (наприклад, тиск у паскалях, довжина в метрах, час у секундах та ін.).

Відносними називаються вимірювання, значення яких подані як відношення вимірюваної величини до однойменної, умовно прийнятої за одиницю, або ж у відсотках (наприклад, вологість повітря).

3. Принципи та методи вимірювання. Для точних вимірювань фізичних величин у метрології розроблені способи використання принципів і засобів вимірювальної техніки, застосування яких дозволяє вилучити із результатів вимірювань ряд систематичних і випадкових похибок і позбавити експериментатора необхідності вводити поправки для їх компенсації, а в деяких випадках взагалі одержувати вірогідні результати. Багато способів використання так і залишаються лише способами, їх застосовують лише в окремих, небагатьох випадках. Проте є й такі способи використання, які необхідні при численних вимірюваннях багатьох величин. Коли вони стають загальними, їх називають **методами вимірювань**.

Принцип вимірювання – фізичне явище або сукупність фізичних явищ, які покладені в основу вимірювання певної величини. Наприклад, вимірювання температури за допомогою використання термоелектричного ефекту, зміни електричного опору терморезисторного перетворювача чи зміни тиску термометричної речовини газового термометра та ін.

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

Метод вимірювання – сукупність способів використання засобів вимірювальної техніки та принципів вимірювань для створення вимірювальної інформації.

Вимірювальна інформація – інформація про вимірювані величини та залежності між ними у вигляді сукупності їх значень.

У метрології у процесі вимірювань найширше застосовуються **прямі методи** вимірювання, що забезпечують визначення шуканої величини за експериментальними даними.

До **прямих методів** вимірювання відносяться: метод безпосередньої оцінки, метод порівняння з мірою, метод протиставлення, нульовий (компенсаційний), диференційний та ін.

Метод безпосередньої оцінки полягає в тому, що вимірювана величина визначається безпосередньо за показниками шкали вимірювального приладу (наприклад, зважування на циферблатних вагах, вимірювання тиску пружинним манометром).

Вимірювання цим методом проводяться дуже швидко, просто і не вимагають високої кваліфікації, оскільки не потрібно ускладнювати вимірювальний прилад і виконувати складні обчислення. Проте точність таких вимірювань невисока через вплив зовнішнього середовища та розмірів шкали приладу.

При проведенні точніших вимірювань слід користуватися **методом порівняння з мірою**, який полягає в тому, що вимірювана величина порівнюється з величиною, відтвореною мірою. Результат вимірювання визначається як сума значень порівняльної міри та показів вимірювального приладу або приймається рівним значенню міри (наприклад, аналітичні ваги).

Метод протиставлення – це метод порівняння з мірою, коли вимірювана і відтворена мірою величини одночасно діють на прилад порівняння, за допомогою якого визначається співвідношення між цими величинами. Значення шуканої величини визначається після досягнення рівноваги за значенням зрівноважуючої величини. Наприклад, на важільних вагах маса зваженого вантажу визначається за масою поставлених ваг.

Нульовий (компенсаційний) метод полягає у порівнянні вимірюваної величини з мірою, а результируючий ефект дії величин на прилад доводиться до нуля. Цей метод широко використовується в автоматичних вимірювальних приладах: автоматичних мостах, потенціометрах, аналізаторах рідин, газів та ін. На результати вимірювань, як правило, майже не впливають зовнішні чинники і джерело живлення вимірювальних електричних схем.

Диференціальний (різницевий) метод полягає в тому, що вимірювальним приладом визначається різниця між вимірюваною величиною і величиною –мірою. Наприклад, вимірювання надмірного тиску в апаратах відносно атмосферного тиску за допомогою диференціального манометра типу ДМ.

Метод збіжності є різновидом методу порівняння з мірою і полягає в тому, що різниця між шуканою і відтвореною мірою величинами вимірюється за збігом шкал або періодичних сигналів. Цей метод використовується при вимірюванні точних сигналів часу, частоти обертання тощо. Крім перелічених методів, у метрологічній практиці використовуються багато інших: інтерферентний – для точних вимірювань лінійних величин, фотоелектричний – у машинобудуванні та ін.

4. Метрологічні показники засобів вимірювання. Вибираючи ЗВ, потрібно враховували такі метрологічні показники.

Діапазон показань – це область значень шкали, обмежена кінцевим і початковим значеннями шкали. Наприклад, для вертикального оптиметра ІКВ діапазон показань становить $\pm 0,08$ мм.

Діапазон вимірювань – це область значень вимірюваної величини, для якої нормуються допустимі похибки ЗВ. Так для оптиметра ІКВ діапазон вимірювань становить 0...200 мм, для штангенциркуля ТТТЦ –І – 0...150 мм.

Ціна поділки шкали – це різниця значень величини, що відповідають двом сусіднім позначкам шкали (для оптиметра ІКВ – 1 мкм, барабана мікрометра – 10 мкм, дуги – ноніуса кутовимірювача – 2').

Точність вимірювань – це якість вимірювань, яка відображає, наскільки результати вимірювань близькі до істинного значення вимірювальної величини.

Чутливість вимірювальних приладів – це відношення вимірювання сигналу на виході вимірювального приладу до тієї зміни вимірювальної величини, яка викликала цей сигнал.

Стабільність засобу вимірювання – це здатність не змінювати в часі його метрологічних характеристик (показань).

Похибка вимірювань – це відхилення результату вимірювання від дійсного значення вимірюваної величини.

Поправка – це величина, яку потрібно алгебраїчно додати до показання вимірювального приладу, щоб дістати таке значення вимірювальної величини, яке є найближчим до дійсного значення.

При конструюванні ЗВ прагнуть, щоб похибка вимірювання була найменшою, а інші метрологічні показники ЗВ знаходились у заданих межах. Для цього поєднують великі передаточні відношення з простотою і технологічністю конструкції. Потрібно також, щоб, де це можливо, на одній прямій розміщувались осі шкали приладу і конструйований розмір деталі, яка перевіряється. Якщо не дотримуватися цієї умови, то перекис і непаралельність напрямних вимірювального приладу призводить до значних похибок у вимірюванні.

Загальною характеристикою засобів вимірювання, яка визначається гранично допустимими похибками, а також іншими властивостями, що впливають на точність, вважається клас точності (ГОСТ 8.401-80).

Клас точності характеризує властивості ЗВ, але не може бути показником точності проведених вимірювань, тому що, визначаючи похибки вимірювання, потрібно враховувати ще й похибки методу, настройки та ін.

3.3. Методи вимірювань

Метод вимірювання – сукупність засобів використання ЗВТ та принципів вимірювання для створення вимірювальної інформації. Метод вимірювання повинен за можливістю мати мінімальну похибку і сприяти вилученню систематичних похибок або переводу їх у розряд випадкових.

Методи вимірювання можна класифікувати за різними ознаками. Відома класифікація за основними вимірювальними операціями. Вона тісно пов'язана з елементами ЗВ, які реалізують ці операції.

Дана класифікація орієнтована на структурний опис ЗВ і тому важлива для вимірювальної техніки, а також метрології інформаційно-вимірювальних систем.

Для метрологічного аналізу більш важливі традиційні класифікації, оснований на таких ознаках.

Перша з них – фізичний принцип, покладений в основу вимірювання. За ним усі методи вимірювання поділяються на електричні, магнітні, акустичні, оптичні, механічні та ін.

У кожній другій ознаці класифікації використовується режим взаємодії засобу й об'єкта вимірювання. У цьому випадку всі методи вимірювання поділяються на статичні і динамічні.

Третьою ознакою може бути вид вимірювальних сигналів, які використовуються у ЗВ. Відповідно з ним методи поділяються на аналогові і цифрові.

Найбільш розробленою є класифікація за сукупністю прийомів використання принципів та засобів вимірювання. За цією класифікацією розрізняють метод безпосередньої оцінки і метод порівняння (рис. 3.3). Ці усталені в літературі назви не зовсім вдалі, оскільки наводять на думку про можливість вимірювання без порівнювання. Більш правильно говорити про опосередковане посереднє порівнювання як за часом, так і щодо фізичної природи вимірюваних величин.

Суть методу безпосередньої оцінки полягає в тому, що про значення вимірюваної величини судять за показанням одного (прямі вимірювання) або декількох (непрямі вимірювання) ЗВ, які заздалегідь проградуєвані в одиницях вимірюваної величини або в одиницях інших величин, від яких вона залежить. Це найбільш поширений метод вимірювання. Його реалізує більшість ЗВ.

Найпростішими прикладами методу безпосередньої оцінки можуть бути вимірювання діаметру мотильової шийки колінчастого вала мікрометром або штангенциркулем, напруги – електромеханічним вольтметром магнітоелектричної системи, зважування на циферблатних вагах, вимірювання тиску пружинним манометром та ін.

Іншу групу утворюють методи порівняння: диференціальний, збіжності, заміщення. До них відносяться всі ті методи, при яких вимірювана величина порівнюється з величиною, що утворюється мірою. Отже, характерною особливістю цих методів порівняння є безпосередньо частина мір у процесі вимірювання.

При диференціальному методі вимірювана величина X порівнюється безпосередньо або посередньо з величиною X_n , відтвореною мірою. Про значення величини X судять за виміряною приладом різницею і за відомою величиною, відтвореною мірою. Отже, При диференційному методі здійснюється неповне порівняння вимірюваної величини.

Він поєднує частину методу безпосередньої оцінки і може дати досить точний результат вимірювання, якщо тільки вимірювана величина і величина, що відтворюється мірою, мало відрізняються одна від одної. Наприклад, якщо різниця цих двох величин складає 1 % і вимірюється з похибкою до 1 %, тим самим похибка вимірювання пошукової величини зменшується до 0,01 % (якщо не враховувати похибку міри).

Прикладом диференціального методу може бути вимірювання індикаторним нутроміром діаметру циліндра двигуна, вольтметром – різниці

двох напруг, з яких одна відома з більшою точністю, а інша є шуканою величиною; вимірювання надмірного тиску в апаратах відносно атмосферного тиску за допомогою диференціального манометра типу ДМ.

Нульовий метод (компенсаційний) – різновид методу диференційного. Він відзначається тим, що ефект порівняння двох величин зводиться до нуля. Це контролюється спеціальним вимірювальним приладом високої точності – нуль-індикатором. У даному випадку значення вимірюваної величини дорівнює значенню, яке відтворює міра. Висока чутливість нуль-індикаторів, а також виконання міри з високою точністю дозволяють мати малу похибку вимірювання.

Приклад нульового методу – зважування на вагах, коли на одному плечі знаходиться вантаж, який зважують, а на іншому – набір еталонних гир. Другий приклад: вимірювання опору за допомогою мосту, який урівноважує. Третій приклад: вимірювання опору в автоматичних вимірювальних приладах (потенціометрах, аналізаторах рідин, газів та ін.).

Метод заміщення – метод непрямого вимірювання з багаторазовим порівнянням до повного врівноваження вихідних величин вимірювального перетворювача з почерговим перетворенням ним вимірюваної величини та вихідної величини регульованої міри.

Приклад методу заміщення – вимірювання великого електричного активного опору шляхом почергового вимірювання сили струму, перебігу через контрольований і зразковий резистор. Живлення ланцюга при вимірюванні повинно здійснюватися від одного джерела постійного струму. Вихідний опір джерела струму і вимірювального приладу – амперметра – повинен бути досить малим порівняно з вимірюваними опорами.

Метод одного збігу; метод ноніуса. Метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вихідних величин двох багатозначних нерегульованих мір, із різними за значеннями ступенями, нульові позначки яких зсунуті між собою на виміряну величину.

Приклади. 1. Вимірювання довжини за допомогою двох лінійок, ціни поділок яких знаходяться в певному відношенні. **2.** Вимірювання часу за допомогою послідовностей періодичних імпульсів, періоди яких знаходяться в певному відношенні.

Метод подвійного збігу; метод конгиденції. Метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням двох квантових фізичних величин: вимірюваної та відтворюваної багатозначною нерегульованою мірою.

Приклад - вимірювання зістикованих інтервалів часу або зістикованих відрізків довжини за допомогою відповідно: послі-довності періодичності імпульсів з відомим значенням їх періоду або лінійки з відомим значенням поділок. Прикладом використання цього методу в електричних вимірюваннях є вимірювання частоти обертання тіла за допомогою стробоскопа.

Метод зіставлення – метод прямого вимірювання із одноразовим порівнянням вимірюваної величини з усіма вихідними величинами багатозначної нерегульованої міри.

Приклади. 1. Вимірювання довжини лінійкою з поділками. 2. Вимірювання інтервалу часу годинником.

Метод зрівноваження з регульованою мірою. Метод прямого вимірювання з багаторазовим порівнянням вимірюваної величини та величини, що відтворюється мірою, яка регулюється до їх повного зрівноваження.

Приклад. Вимірювання електричної напруги компенсатором.

3.4. Класифікація засобів вимірювальної техніки

Метод вимірювання реалізується у технічному ЗВ – технічному засобі, який застосовується під час вимірювання і має нормовані метрологічні характеристики.

Якість вимірювань залежить від грамотного використання ЗВ, від знання їх властивостей. У першу чергу, потрібно знати класифікацію засобів вимірювань, їх метрологічні характеристики, похибки ЗВ і причини їх виникнення.

ЗВ не повинні вносити помилок у значення вимірюваних ними величин, а якщо цього не можна уникнути, то передбачається можливість урахування або виключення цих помилок відповідними прийомами.

ЗВ, відповідно до Державної системи вимірювань (ДСВ), підрозділяють на групи: еталони, зразкові міри і прилади, виробничі міри і прилади.

Еталони – це міри і прилади, призначені для відтворення і зберігання будь-якої величини з найвищою точністю. До них належать: державний еталон метра, еталонні набори кінцевих мір довжини.

Зразкові міри і прилади призначаються для перевірки і граду-ювання лабораторних і заводських мір.

Виробничі міри і прилади призначаються для перевірки виробів в умовах виробництва.

За характером використання у виробничому процесі ЗВ поділяють на міри, вимірювальні прилади (інструменти) і калібри.

Залежно від призначення, будови, принципу дії та інших характерних ознак, ЗВТ застосовуються для технологічних та теплотехнічних вимірювань і поділяються на групи.

Основна класифікація передбачає розподіл ЗВ за родом вимірюваних величин. Для найбільш поширених засобів вимірювання умовно прийняті такі назви:

- для засобів вимірювання температури: термометри і пірометри;
- тиску: манометри, вакуумметри, мановакуумметри, тягоміри, напороміри, барометри;
- витрати та кількості: витратоміри, лічильники та витра-томіри з лічильниками;
- рівня: рівнеміри та покажчики рівня;
- складу димових та інших газів: газоаналізатори, киснеміри та ін.;
- аналізу та складу рідини: аналізатори рідини, кондуктометриї, рН-метри, густиноміри, рефрактометри та ін.;
- вологості: вологоміри, психрометри, гігрометри тощо.

Додатково засоби вимірювань поділяються на групи за такими ознаками:

- за принципом дії та використанням енергії: механічні, електричні, рідинні, пневматичні, гідравлічні, хімічні, ультразвукові, інфрачервоні, радіоізотопні та ін.;
- формою показань: аналогові та цифрові;
- характером відображення: показуючі, самописні, реєструючі, інтегруючі;
- призначенням: промислові (технічні), лабораторні, зразкові, еталонні;
- місцем розташування: щитові, місцеві, дистанційні;
- габаритами: мініатюрні, малогабаритні, нормальні та велико-габаритні.

Майже кожний ЗВ можна віднести до будь-якої групи. Наприклад, термометр може бути промисловим, самописним, електричним, щитовим, малогабаритним та ін.

Промислові (робочі) ЗВ є найпоширенішими ЗВТ. Вони використовуються для вимірювання технологічних або теплотехнічних параметрів,

мають порівняно просту структуру та конструкцію, високу надійність і необхідну точність, прості в експлуатації та ремонті.

Показання промислових приладів видно на велику відстань, а наявність сигнальних пристроїв дозволяє впроваджувати звукову та світлову сигналізацію відхилень технологічних параметрів.

Лабораторні прилади використовуються для більш точних лабораторних вимірювань при наукових дослідженнях та з метою визначення похибок ЗВ. Для одержання більшої точності вимірювань лабораторні засоби виготовляються більш ретельно, мають досконаліші схеми та спеціальні засоби для відліку показань (оптичні пристрої), до їх показань вводяться поправки, визначені експериментальним або розрахунковим шляхом.

3.5. Метрологічні показники засобів вимірювання

Вибираючи ЗВ, потрібно враховували такі метрологічні показники.

Діапазон показань – це область значень шкали, обмежена кінцевим і початковим значеннями шкали. Наприклад, для вертикального оптиметра ІКВ діапазон показань становить $\pm 0,08$ мм.

Діапазон вимірювань – це область значень вимірюваної величини, для якої нормуються допустимі похибки ЗВ. Так для оптиметра ІКВ діапазон вимірювань становить 0...200 мм, для штангенциркуля ТТТЦ – I – 0...150 мм.

Ціна поділки шкали – це різниця значень величини, що відповідають двом сусіднім позначкам шкали (для оптиметра ІКВ – 1 мкм, барабана мікрометра – 10 мкм, дуги – ноніуса кутовимірювача – 2').

Точність вимірювань – це якість вимірювань, яка відображає, наскільки результати вимірювань близькі до істинного значення вимірювальної величини.

Чутливість вимірювальних приладів – це відношення вимірювання сигналу на виході вимірювального приладу до тієї зміни вимірювальної величини, яка викликала цей сигнал.

Стабільність засобу вимірювання – це здатність не змінювати в часі його метрологічних характеристик (показань).

Похибка вимірювань – це відхилення результату вимірювання від дійсного значення вимірюваної величини.

Поправка – це величина, яку потрібно алгебраїчно додати до показання вимірювального приладу, щоб дістати таке значення вимірювальної величини, яке є найближчим до дійсного значення.

При конструюванні ЗВ прагнуть, щоб похибка вимірювання була найменшою, а інші метрологічні показники ЗВ знаходились у заданих межах. Для цього поєднують великі передаточні відношення з простотою і технологічністю конструкції. Потрібно також, щоб, де це можливо, на одній прямій розміщувались осі шкали приладу і конструйований розмір деталі, яка перевіряється. Якщо не дотримуватися цієї умови, то перекіс і непаралельність напрямних вимірювального приладу призводить до значних похибок у вимірюванні.

Загальною характеристикою засобів вимірювання, яка визначається гранично допустимими похибками, а також іншими властивостями, що впливають на точність, вважається клас точності (ГОСТ 8.401 –80).

Клас точності характеризує властивості ЗВ, але не може бути показником точності проведених вимірювань, тому що, визначаючи похибки вимірювання, потрібно враховувати ще й похибки методу, настройки та ін.

3.6. Калібрування засобів вимірювальної техніки

Це визначення в певних умовах або контроль метрологічних характеристик ЗВТ, на які не поширюється державний метрологічний нагляд. Засоби вимірювальної техніки, які підлягають державним випробуванням (згідно зі статтею 18 Закону про метрологію та метрологічну діяльність) і на які не поширюється державний метрологічний нагляд, підлягають калібруванню під час випуску з виробництва. Необхідність проведення калібрування в експлуатації ЗВТ, на які не поширюється державний метрологічний нагляд, визначається їх користувачем.

Калібрування проводиться метрологічними службами юридичних осіб з використанням еталонів, супідрядних державним еталонам одиниць величин. Результати калібрування ЗВ засвідчуються каліб-рованим знаком, нанесеним на ЗВ, або свідченням (сертифікатом) про калібрування, а також записом в експлуатаційних документах.

Повірка ЗВТ. Повірку ЗВТ здійснюють з метою встановлення або підтвердження придатності ЗВТ до застосування. Під терміном «повірка» розуміють визначення метрологічним органом похибок ЗВТ і встановлення його придатності для вимірів.

Повірка ЗВТ – це встановлення придатності ЗВТ, на які поширюється державний метрологічний нагляд, до застосування на підставі результатів контролю їхніх метрологічних характеристик.

Державну повірку ЗВТ виконують органи державної метрологічної служби, а калібрування – метрологічні служби підприємств, організацій та міністерств. Державній повірці підлягають вихідні ЗВТ і робочі засоби, які застосовуються в охороні здоров'я; при виробництві медикаментів; при здійсненні заходів щодо охорони навколишнього середовища; при виконанні робіт, пов'язаних з обов'язковою сертифікацією продукції і т. д. ЗВТ, що не підлягають державній повірці, калібруються відомчими метрологічними службами. Крім повірки, державні метрологічні організації проводять випробовування – встановлення придатності до випуску ЗВТ на конструкторських заводах. Повірку можуть здійснювати тільки ті органи, які акредитовані ДКТРСП України. Фахівці територіальних органів, які проводять державну повірку ЗВ, повинні бути атестовані і володіти статусом повірника згідно з процедурою ДКТРСП.

3.7. Еталон як засіб вимірювання

Зберігання та відтворення одиниць вимірювань з метою передачі їх розмірів ЗВТ, які застосовуються на території України, забезпечуються державними еталонами.

Для забезпечення єдності вимірювань необхідна чітка тотожність одиниць, у яких були б проградуїровані всі засоби технічних вимірювань однієї й тієї ж самої ФВ. Це досягається шляхом точного відтворення та збереження прийнятих на Міжнародній конференції з мір і ваги одиниць ФВ і передачі їх розмірів ЗВ.

Відтворення, збереження і передача розмірів одиниць проводиться за допомогою еталонів та зразкових ЗВ. Вищою ланкою у метрологічному колі передачі розмірів одиниць вимірювання ФВ є еталони.

Еталон одиниці ФВ – це ЗВТ, який забезпечує відтворення і зберігання одиниці ФВ та передавання її розміру відповідним засобам, що стоять нижче за повірочною схемою, і офіційно затверджений як еталон.

Усі основні одиниці ФВ відтворюються з найвищою точністю за допомогою міжнародних еталонів відповідних одиниць і зберігаються в Міжнародному бюро мір та ваги (МБМВ) у спеціальних лабораторіях у м. Севра поблизу Парижа. Програмою діяльності МБМВ передбачені систематичні міжнародні зіставлення національних еталонів великих метрологічних лабораторій різних держав з міжнародними еталонами та між собою. Еталони метра та кілограма звіряються один раз на 25 років,

електричні та світлові еталони (ампера, вольт, ома, кандели) – один раз на 3 роки. Проводяться також епізодичні міжнародні звіряння еталонів джерел іонізаційного випромінювання, платинових термометрів опору, температурних ламп та ін.

Основне призначення еталонів – бути матеріальною базою для відтворення і збереження одиниць ФВ.

Державні еталони є виключно державною власністю, затверджуються ДКТРСП України та перебувають у його віданні. Однією з основних вимог, які висуваються до еталонів, є точність. Як правило, створення, зберігання, застосування, відтворення еталонів регламентовано певним стандартом країни, наприклад, ДСТУ 3231 –95 «Метрологія. Еталони одиниць фізичних величин: основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування». Розробляються стандарти і на повірочні схеми з використанням еталонів, зокрема для концентрації газів у газових середовищах (ДСТУ 3214 –95). Питаннями розробки, зберігання, вдосконалення еталонів займаються науково-дослідні інститути ДКТРСП України. Еталони складають особливу групу ЗВ.

Еталони для посередніх вимірювань ФВ не застосовуються, а використовуються для передачі розміру одиниць іншим ЗВ. За точністю відтворення розмірів одиниць і за службовим призначенням еталони поділяються на дві групи: первинні і вторинні. Для наочності видів еталонів подано схему (рис. 3.33).



Рис. 3.33. Класифікація видів еталонів

Первинним називають еталон, який забезпечує відтворення розміру ФВ із найвищою в державі точністю.

Вторинним називають еталон, що відтворює розмір одиниці ФВ за первинним еталоном та періодично звіряється з ним.

У свою чергу, первинні еталони поділяються на спеціальні, державні, вихідні; вторинні еталони за метрологічним призначенням поділяються на: еталони-копії, еталони-свідки, еталони-порівняння, робочі еталони.

Первинні еталони. Якщо еталон відтворює одиницю з найбільш високою в країні точністю, то він називається первинним. Первинні еталони основних одиниць відтворюють одиницю відповідно до її визначення.

Стає очевидним (розглядаючи, наприклад, випадок з одиницею струму – ампер), що навіть якщо природні еталони й існують, вони не обов'язково відрізняються особливою точністю і простотою реалізації. Проте будь-яка промислово розвинена країна має націо-нальну лабораторію з еталонів (у Великобританії, наприклад, це Фізична лабораторія в Теддінгтоні, у США – це NIST – Національний інститут науки і технології). Ці національні лабораторії зберігають «первинні стандартні еталони», які у випадку з кілограмом є по-хідними від міжнародного стандарту кілограма. Щодо інших одиниць вимірювань у системі СІ базою для побудови вимірювальної ланцюжка є приладове обладнання, здатне відтворювати умови, встановлені у визначенні базової одиниці СІ. Наприклад, щодо одиниці часу це так званий «цезієвий годинник». Хоча тривалість одного періоду встановленого атомного переходу становить піко – секунду, цього достатньо для перевірки частотоміром частот радіо-мовлення, і тому вони можуть бути сприйняті іншими центрами.

Інші виміри, наприклад довжини, можуть здійснюватися з використанням проміжних еталонів та їх ієрархії, що починається із первинного еталона (рис. 3.34).

Первинні еталони є вершиною піраміди або ієрархії стандартів, які існують і використовуються в країні (рис. 3.34). Робочі інструменти повіряються «робочими еталонами», які можуть використовуватися для щоденного калібрування на робочому місці перед початком використання вимірювального інструменту. У свою чергу, робочі еталони калібруються за лабораторними або «проміжними еталонами». Можливий цілий ланцюжок проміжних еталонів, що проходить через спеціалізовані лабораторії калібрування до національного еталону, який може порівнюватися з національними еталонами інших країн.



Рис. 3.34. Ієрархія стандартів

Спеціальний еталон відтворює одиницю в особливих умовах, у яких пряма передача розміру одиниці від існуючих еталонів технічно можлива з необхідною точністю (високий тиск, температура і т. ін.). Він замінює в цих умовах первинний еталон.

Державний еталон – офіційно затверджений первинний еталон, який забезпечує відтворення одиниці вимірювань та передачу її розміру іншим еталонам із найвищою у країні точністю; це первинний або спеціальний еталон, офіційно затверджений як вихідний для країни (в окремих випадках може бути використаний спеціальний еталон). Інакше кажучи, державний еталон – це офіційно затверджений первинний еталон у якості вихідного для держави.

Державний еталон одиниці величини – еталон одиниці величини, визнаний рішенням уповноваженого на те державного органу в якості вихідного на території своєї держави.

Вихідний еталон – еталон, який має найвищі метрологічні властивості серед еталонів, що наявні на підприємстві чи в організації.

У метрологічній практиці широко використовують вторинні еталони, значення яких встановлюється за найнижчими первинними еталонами.

Вторинні еталони створюються і затверджуються в тих випадках, коли це необхідно для організації повірочних робіт, для збереження і меншого зносу державного еталона.

За своїм метрологічним призначенням вторинні еталони поділяються на еталони – копії, еталони передавання, еталони – свідки та робочі еталони.

Еталон-копія – це вторинний еталон, що призначений для збереження одиниці й передачі її розміру робочим еталонам.

Еталон порівняння – це вторинний еталон, що призначений для порівняння еталонів, які з тих чи інших причин не можуть бути безпосередньо порівняними один із одним.

Еталон –свідок – це вторинний еталон, що призначений для перевірки збереження державного еталона, для заміни на випадок пошкодження або втрати. Еталон –свідок використовується лише тоді, коли державний еталон є невідтворним.

Робочий еталон – це вторинний еталон, призначений для збереження одиниці і передачі її розміру зразковим ЗВ найбільш високої точності. Він призначений для повірки чи калібрування ЗВТ.

Еталон передавання – це вторинний еталон, що призначається для взаємного порівняння еталонів, які за тих чи інших обставин не можуть бути звірені безпосередньо.

Вторинні еталони можуть подаватися у вигляді комплексу ЗВ, поодиноких і групових еталонів та еталонних приладів.

Поодинокий еталон складається з одного вимірювального засобу (міри, приладу), який забезпечує відтворення та збереження одиниці самостійно, без участі інших ЗВ того самого типу. Прикладом поодинокого еталона є вторинний еталон одиниці маси – кілограм – у вигляді платино-іридієвої та сталеві гіри.

Груповий еталон – еталон, до складу якого входить група ЗВТ або група еталонів. Прикладом групового еталона є еталон-копія вольту у вигляді 20 нормальних елементів. Вторинні еталони (робочі) використовуються у метрологічних інститутах, метрологічних тери-торіальних органах Держстандарту України, а з дозволу Держстандарту

України допускається їх зберігання та використання в органах відомчої метрологічної служби.

Усі ЗВ, які використовуються не для передачі розміру одиниць, а для практичного вимірювання, називаються робочими ЗВТ. Робочі ЗВТ забороняється використовувати для перевірки.

1. Еталон одиниці довжини – метр. Наприкінці XVIII століття при введенні метричної системи мір був прийнятий перший еталон одиниці довжини – метр. За метр прийняли одну десятимільйонну частину чверті Паризького меридіана.

У 1799 році на основі вимірної частини дуги меридіана був виготовлений **еталон метра** у вигляді платинової лінійки шириною 25 мм,

товщиною 4 мм та довжиною в 1 м. Пізніше платиновий метр передали на збереження до Національного архіву Франції, який одержав назву «метра Архіву».

Повторні вимірювання дуги меридіана показали, що довжина метра дещо коротша за дійсний «природний» метр, проте Міжнародна комісія з прототипів метричної системи у 1872 році вирішила відмовитися від «природного» еталона метра і за одиницю довжини прийняла «метр Архіву».

За рішенням цієї комісії був виготовлений 31 прототип метра у вигляді штрихової міри з платино-іридієвого сплаву. Серед них прототип № 6 при температурі 0°C виявився найбільш тотожним «метру Архіву» і в 1889 р. на I Генеральній конференції з мір та ваги був ухвалений як міжнародний еталон метра. Решта 30 прототипів були розподілені між державами-учасницями, які у 1875 році підписали Метричну конвенцію.

Еталон метра – це платино-іридієва фігурна лінійка довжиною 102 см з поперечним перерізом у формі Х, вписаній в увяний квадрат, сторона якого дорівнює 20 мм. На верхніх площинах Х-форми на обох кінцях лінійки проведено по 3 штрихові лінії, а одиниця довжини в 1 метр розташована між середніми штриховими лініями (рис. 3.35).



Рис. 3.35. Міжнародний еталон метра, який використовувався з 1889 до 1960 року



Рис. 3.36. Еталон метра, який використовувався в метрологічній практиці до 1973 року

Російська імперія у 1889 році одержала платино-іридієвий прототип метра № 28, який пізніше був затверджений як державний еталон метра в колишньому СРСР.

У 1927 році VII Генеральна конференція з мір та ваги ухвалила таке визначення метра: «Одиниця довжини – м, визначається відстанню при 0 °С між осями двох середніх штрихів, нанесених на платино – іридієвому бруску, який зберігається у Міжнародному бюро мір та ваги і прийнятий за еталон метра I Генеральною конференцією з мір і ваги, за умови, що ця лінійка

зберігається при нормальному атмосферному тиску і підтримується двома роликами.

Науково-технічний прогрес потребує підвищення точності еталона одиниці довжини, тому що платино-іридієвий прототип метра неспроможний забезпечити необхідну високу точність відтворення, вищу за 0,1-0,2 мкм. До того ж назріла необхідність розроблення природного неруйнівного еталона, що обумовлює встановлення нового природного еталона метра.

У 1960 році XI Генеральною конференцією з мір та ваги було ухвалено новий хвильовий еталон метра, який виражається в довжинах світлових хвиль у вакуумі оранжевої лінії спектру криптону –86. Відповідно до рішення конференції, «метр – це довжина, що дорівнює 1 650 763,73 довжин хвиль випромінювання у вакуумі й відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ та $5s_5$ атома криптону –86».

Новий еталон метра можна відтворити у метрологічних лабораторіях з точністю, яка на порядок вища від платино –іридієвого його прототипу, хоча на конференції підкреслювалося, що точність нового еталона є недостатньою через несиметричність випромінювання монохроматичного джерела.

Місце зберігання еталона метра у колишньому СРСР – Всесоюзний науково-дослідний інститут метрології ім. Д. І. Менделєєва (ВНДІМ) (м. Санкт-Петербург). В Україні еталон метра зберігається в Харкові.

За рішенням останньої Генеральної конференції з мір і ваги ухвалене таке визначення одиниці довжини «метр»:

Метр – довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за $1/299\,792\,458$ частину секунди.

2. Еталон одиниці маси – кілограм. При виготовленні платино – іридієвих еталонів кілограма за міжнародний прототип було прийнято той, маса якого найменше відрізнялася від маси «кілограма Архіву». Міжнародний прототип кілограма – це гиря у вигляді прямого циліндра із заокругленими ребрами діаметром і висотою 39 мм (рис. 3.8).

Оскільки прийнятий умовний прототип одиниці маси – літр – також не був абсолютно тотожним кубічному дециметру ($1\text{ л} = 1,000028\text{ дм}^3$) і невідповідність між ними становила різницю між масою міжнародного прототипу кілограма і масою кубічного дециметра води, то у 1964 році XII Генеральна конференція з мір та ваги ухвалила рішення про прирівнювання об'єму 1 літра до 1 дм^3 .

Зазначимо, що у період встановлення метричної системи мір не було чіткого розуміння маси та ваги, тому міжнародний прототип кілограма

приймали як еталон одиниці ваги. Проте вже при затвердженні міжнародного прототипу в 1889 р. кілограм був прийнятий як прототип маси. Чітке розмежування між кілограмом маси та кілограмом сили було здійснене за рішенням III Генеральної кон-ференції з мір та ваги.

Чітке розмежування між кілограмом маси та кілограмом сили було здійснене за рішенням III Генеральної конференції з мір та ваги. За рішенням I Конференції з мір та ваги із 42 виготовлених прототипів кілограма Російській імперії були передані платино-іридієві прототипи кілограма № 12 (рис. 3.38) і № 26. Прототип кілограма № 12 був затверджений у 1899 р. як державний еталон маси факультативно (фунт повинен був періодично порівнюватися з кілограмом), а прототип № 26 – міг використовуватися в якості вторинного еталону. Державним первинним еталоном кілограма в колишньому СРСР був платино-іридієвий прототип № 12 – гиря у вигляді прямого циліндра з заокругленими ребрами діаметром та висотою 39 мм. Густина платино-іридієвого сплаву – 21548,1 кг/м³, вміст іридію у сплаві – 10,08 – 10,09 %, об'єм кілограма при 0°С становить 46,408 см³.



Рис. 3.37. Міжнародний прототип кілограма



Рис. 3.38. Платино –іридієві прототипи кілограма № 12

У 1899 р. маса прототипу кілограма № 12 дорівнює 1,000000068 кг. За результатами звіряння його з міжнародними еталонами у 1948-1954 рр. маса прототипу № 12 стала дорівнювати 1,00000085 кг.

8 жовтня 1901 р. з ініціативи Д. І. Менделєєва у Харкові була відкрита перша в Україні повірочна палата для вивірки і таврування торговельних мір і ваги. З цієї події бере початок історія метрології та стандартизації в Україні. На рис. 3.39 показано унікальний робочий еталон маси – позолочена гиря масою 1 кг, яка очолювала повірочні схеми ЗВ маси в Україні з перших місяців роботи повірочної палати, тобто з 1901 і до 1939 року.



Рис. 3.39. Робочий еталон маси

Більш ніж за 120 років існування описаного прототипу кілограма, звичайно, були спроби зробити більш сучасний еталон на основі фундаментальних фізичних сталих мас різних атомних частин (протона, електрона та ін.). Однак на сучасному рівні науково-технічного прогресу поки не вдалося відтворити цим методом масу кілограма з меншою погрешністю, ніж існуюча.

З розвитком наукових робіт щодо створення нових природних еталонів одиниць ФВ, що базувалися на атомних постійних величинах (метр – на довжині світлових хвиль; секунда – на частоті коливань атомів та молекул), виникло питання про зв'язок одиниці маси атомними константами. Цим пояснюється пропозиція щодо вико-ристання для метрологічних цілей такої константи, як маса нейтрона. Можна припустити, що це дасть можливість з високою точністю ув'язати сучасний умовний еталон маси з природними константами маси атомних часток.

Еталон «кілограм» все ще «припадає пилом» у глибокому підвалі під Парижем. Словосполучення «припадає пилом» зовсім не є стилістичною прикрасою – пил насправді поступово накопичується на еталоні кілограма, незважаючи на всі контрзаходи. Дістати платино – іридієві циліндри і протерти їх не можна – по-перше, при витяганні на ньому знову ж таки осяде пил, а по-друге, протирання або навіть обмахування щіточкою неминуче приведе до «підскакування» декількох молекул. Іншими словами, незалежно від того, роблять або не роблять щось з еталоном, його маса з часом змінюється. Довгий час вважалося, що ці зміни незначні, проте перевірка, яку було проведено кілька років тому, показала, що за останній час еталон «схуд» на 50 мікрограмів, а це вже значні втрати.

Можливий вихід із цього скрутного становища (за мільярд років еталон стане легшим на третину) запропонували в 2007 році два американських

учених із Технологічного інституту Джорджії. Замість мінливого циліндра вони запропонували вважати стандартом маси куб із вуглецю, який буде містити строго певну кількість атомів. Так як маса кожного окремого атома постійна, то й маса їх сукупності також не буде змінюватися. Дослідники розрахували, що куб масою рівно один кілограм буде складатися з 2250 x 281 489 633 атомів (50 184 513 538 686 668 007 780 750 атомів), а його грань складе 8,11 сантиметри. За три роки вчені уточнили деякі деталі і представили свої міркування.

Американські фізики перейнялися проблемою стандарту кілограма і вибрали в якості «еталонного» елемента вуглець неспроста – до цього часу вони займалися уточненням числа Авогадро – однієї з фундаментальних констант, яка визначає, скільки атомів міститься в одному молі будь-якої речовини. Хоча це число і є одним із найголовніших у хімії, його точного значення не існує (серед інших питань учені, наприклад, вирішували, парне воно чи ні). Число Авогадро підібрано так, щоб маса моля у грамах дорівнювала масі молекули (атома) в атомних одиницях маси. Атом вуглецю має масу 12 атомних одиниць маси, а значить, маса моля вуглецю повинна складати 12 грамів. Уточнивши число Авогадро і прийнявши його рівним 844 468 863 (602 214 098 282 748 740 154 456), дослідники змогли розрахувати необхідну кількість атомів вуглецю в еталоні. Нову роботу було розглянуто на Генеральній конференції з мір та ваги, яка відбулася в 2011 році.

У Вашингтонському національному інституті стандартів і технології Було розроблено концепцією електронного кілограма. Коротко суть пропонованого ними методу така: еталон визначається через силу струму, яка необхідна для створення магнітного поля, здатного врівноважити вантаж масою в один кілограм. Цей спосіб дуже хороший, тому що дозволяє добитися високої точності (він заснований на використанні ще однієї фундаментальної константи – постійної Планка), проте сам експеримент надзвичайно складний.

Ще один варіант нового еталона маси – кремнієва сфера, параметри якої розраховані таким чином, що вона буде містити строго певну кількість атомів (цей розрахунок можна провести, так як ученим відома відстань між окремими атомами, а сам процес виробництва чистого кремнію дуже добре налагоджений). Така сфера навіть була створена, але щодо неї негайно виникли такі ж складнощі, які стосуються нинішнього еталона: з часом сфера втрачає частину своїх атомів, і, крім того, на ній утворюється плівка оксиду кремнію.



Рис. 3.40. – Кремнієва сфера

Третій підхід до створення еталону маси припускає, що він буде кожного разу вироблятися *de novo*. Для отримання стандарту маси необхідно накопичувати іони вісмуту та золота до тих пір, поки їх сумарний заряд не досягне певного значення. Цей метод уже визнали незадовільним: він вимагає занадто багато часу, а результати погано відтворюються. Взагалі з високою ймовірністю всі описані способи отримання нового еталону кілограма, крім способу, заснованого на використанні числа Авогадро, залишаться тільки в пам'яті істориків науки, так як, на відміну від інших, еталон кілограм у вигляді куба з ізотопу вуглецю -12 заснований на прямому використанні одного з фундаментальних атомних понять.

Поки що неясно, чи стане вуглецевий еталон загальновизнаним або ж учені придумують новий, більш зручний спосіб. Але той факт, що в Парижі зберігається циліндр, який вірою і правдою служив людям 120 років, незабаром «відправиться на пенсію», сумнівів не викликає.

3. Еталон одиниці часу – секунда. Ще в стародавні часи відлік часу ґрунтувався на обертанні Землі навколо своєї осі. До недавнього часу секунда визначалася як $1/8640$ частини середньої сонячної доби. За середню сонячну добу прийнято інтервал часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями середнього Сонця. Під середнім Сонцем розуміли уявне Сонце, яке рівномірно рухається по небесному екватору і здійснює один оберт по небосхилу за той проміжок часу, що й справжнє Сонце, яке рухається нерівномірно за екліптикою. Проте спостереження показали, що обертанню Землі властиві нерегулярні коливання, а це не дозволяє вважати його природною стабільною основою визначення одиниці часу.

Середня сонячна доба визначається з похибкою 10^{-7} . Ця точність недостатня для сучасного стану техніки частот.

Потрібен був новий природний еталон часу, який забезпечував би високу точність відтворення одиниці часу – секунди. У 1960 році було прийняте нове астрономічне визначення одиниці часу, в основу якого покладено не обертання Землі навколо своєї осі, а рух Землі навколо Сонця. Це забезпечувало підвищення точності вимірювання одиниці часу на три порядки (у 1000 разів).

За секунду прийняли $1/31556925,9747$ частини тропічного року на 0 січня 1900 року о 12 –й годині ефемеридного часу. Тропічний рік сам по собі не є постійним, тому дата «0 січня 1900 р. 12 годин» виражена у прийнятому астрономами відліку часу і відповідає полудню 31 грудня 1899 р. Під ефемеридним часом розуміють час у системі рахунку, де тривалість одиниці дорівнює ефемеридній секунді, визначеній через тропічний рік на 0 січня 1900 р.

Практично точна одиниця часу стала доступною завдяки сигналам точного часу, що передаються по радіо з кварцових годинників, які є мірами частоти. Останнім часом створені нові молекулярні та атомні еталони, частоти і часу, які ґрунтуються на здатності молекул та атомів випромінювати і поглинати енергію під час переходу між двома енергетичними рівнями в діапазоні радіочастот. У 1967 р. XIII Генеральна конференція з мір та ваги ухвалила нове визначення секунди як інтервал часу, протягом якого відбувається 9 192 631 770 коливань. Такі коливання відповідають резонансній частоті енергетичного переходу між рівнями надтонкої структури основного стану атома *цезію-133* за відсутності збурень зовнішніми полями.

Стабільність цезієвих еталонів дорівнює 10^{-11} , що дозволяє використовувати їх службам часу та частоти.

У 1997 році Міжнародне бюро мір і ваги уточнило, що в цьому визначенні фігурує атом цезію, що перебуває при абсолютній нульовій температурі. У новітніх моделях цезієвого годинника (їх називають фонтанними) ця вимога майже ідеально реалізується за допомогою лазерного охолодження атомів. Еталонні цезієві годинники американського Національного інституту стандартів і технології (NIST) зараз забезпечують відносну точність відтворення одиниці часу – секунди на рівні $\sim 3,3 \times 10^{-16}$. Це найбільш точні годинники у світі. А взагалі найкращу перспективу на найближче майбутнє мають оптичні стандарти частоти, засновані на переходах в однократних іонах ртуті, ітербію чи стронцію або в нейтральних

атомах стронцію чи ртуті – вони надзвичайно стабільні в часі. Вже зараз точність окремих експериментальних зразків досягає 2×10^{-15} секунди і навіть вище, а теоретично вони здатні забезпечити точність відтворення одиниць часу і частоти на рівні $10^{-17} - 10^{-18}$.

У стронцієвих оптичних годинах (рис. 3.41) іони стронцію поміщені в оптичну пастку на перехресті шести лазерних променів.



Рис. 3.41. Стронцієвий оптичний годинник

Під впливом електромагнітних хвиль лазерів іони міцно «сидять» в енергетичних ямах, слабо взаємодіючи один з одним і випромінюючи блакитне світло із частотою близько 429 терагерц. Стронцієвий годинник у тисячу разів точніший за цезієвий, що використовується сьогодні як еталон часу і частоти. Можливо, незабаром еталон буде замінено.

4. Еталон одиниці сили електричного струму – ампер. У 1893 р. Міжнародний конгрес електриків у Чикаго затвердив перший еталон сили електричного струму – ампер, установивши так званий міжнародний ампер. Ампер відтворювався за допомогою срібного вольтметра і визначався так: «Міжнародний ампер – незмінний струм, який, проходячи через водний розчин азотнокислого срібла при дотриманні інструкції та специфікації виділяє 0,001118 грамів срібла за 1 с».

У 1948 р. при переході на абсолютну практичну систему електричних одиниць міжнародний ампер було відмінено, а в основу сучасного еталона ампера покладено закон взаємодії електричних струмів.

Визначення основної електричної одиниці – ампера – залишається незмінним з 1948 року. IX Генеральна конференція з мір та ваги у 1948 р. ухвалила таке визначення ампера: «Ампер – сила незмінного струму, який, проходячи по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і занадто малого круглого перерізу та розміщених на відстані 1 метра один від одного у вакуумі, при силі струму в провідниках в 1 А

утворював би між провідниками силу взаємодії у $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожний метр довжини».

Зрозуміло, що виготовити еталон на базі цього визначення неможливо, але, на щастя, й не потрібно. Ампер можна реалізувати за допомогою вимірювання силової взаємодії між струмами будь-якої конфігурації, якщо тільки правильно розрахувати геометрію приладу. Було прийнято Державний первинний еталон ампера, який був реалізований за допомогою струмових терезів, що відтворюють ампер з точністю до 10^{-5} . Такий самий прилад був встановлений в британській Національній фізичній лабораторії в Теддінгтоні (зараз – Національна лабораторія вимірів). У США ампер спочатку був відтворений через еталонний вольт (дуже стабільні електричні батареї) і еталонний ом (прецизійні дровові резистори), виготовлені та відкалібровані в Національному бюро стандартів (сучасний NIST). Відношення вольт і ома дало еталонний ампер з точністю 10^{-7} . У теперішній час вольт реалізують за допомогою квантового низькотемпературного ефекта Джозефсона, а ом – за допомогою квантового ефекта Холла (такий стандарт з 1990 року прийнятий в усьому світі). Це дозволяє відтворювати ампер з відхиленням, що не перевищує 10^{-9} . Проте не виключено, що в майбутньому визначення ампера переглянуть, висловивши його через елементарний заряд електрона.

Державний первинний еталон ампера – це комплекс вимірювальних засобів у складі струмових ваг електродинамічної системи, ваг з дистанційним управлінням та апаратури для передачі розміру одиниці. Похибка відтворення розміру одиниці сили струму державним первинним еталоном ампера не перевищує 1×10^{-3} %.

Досягнення сучасної фізики в галузі дослідження атомного ядра розкривають нові можливості для розробки досконаліших еталонів одиниці електричного струму та заряду.

5. Еталон одиниці температури – кельвін. Вимірювання температури з моменту винаходу термометра Галілеєм у 1598 р. ґрунтувалося на використанні властивостей термометричної речовини (газу, рідини) і пов'язане з іменами таких учених, як Фаренгейт, Реомюр, Цельсій, Томсон (Кельвін) та ін.

У середині XVIII століття англійський учений Уільям Томсон, який у 1892 р. за наукові заслуги отримав титул барона Кельвіна (Kelvin), показав, що можна встановити термодинамічну температурну шкалу, яка б не залежала від термометричної речовини.

Винайдення термодинамічної температурної шкали ґрунтується на II законі термодинаміки. Якщо в оберненому циклі Карно тіло, що здійснює цикл, поглинає теплоту Q_1 при температурі T_1 віддає тепло Q_2 при температурі T_2 , то відношення абсолютних температур T_1/T_2 дорівнює відношенню кількості тепла Q_1/Q_2 . Згідно з положенням термодинаміки, це відношення не залежить від властивостей термо-динамічної речовини.

Вимірюючи кількість теплоти з достатньою точністю, можна визначити співвідношення температур та температуру конкретного об'єкта.

Встановлена таким чином термодинамічна температурна шкала, яка незалежна від властивостей термометричної речовини, називається шкалою Кельвіна.

При встановленні термодинамічної температурної шкали для збереження наступності числового вираження її зі стоградусною температурною шкалою Цельсія температурний проміжок між точками танення льоду та кипіння води прийняли за 100°C .

Томсон і незалежно від нього Д. І. Менделєєв довели доцільність побудови термодинамічної шкали температур за однією реперною точкою (реперні точки в термометрії – первинні відтворені температурні точки, кожній з яких присвоєна визначена температура. На Р.т. побудована Міжнародна практична температурна шкала) – точкою абсолютного нуля. Така шкала має значні переваги і дозволяє визначити абсолютну температуру точніше, ніж шкала з двома реперними точками.

Похибка відтворення точки кипіння води становить $0,002 - 0,01^\circ\text{C}$, точка танення льоду – $0,0002 - 0,001^\circ\text{C}$, потрійна точка води – $0,0001^\circ\text{C}$.

X Генеральна конференція з мір та ваги у 1954 році ухвалила рішення про термодинамічну температурну шкалу з однією реперною точкою – потрійною точкою води, яка вища за точку танення льоду на $0,01^\circ\text{C}$ ($273,16\text{ K}$).

Таким чином, термодинамічна температура є основною і позначається символом T . Її одиницею служить кельвін – $1/273,16$ частини потрійної точки води (Примітка. Потрійна точка – стан рівноважного співіснування трьох фаз речовини, зазвичай твердої, рідкої і газоподібної. Температура П. т. води (точки співіснування – льоду, води і пари,) дорівнює $0,01^\circ\text{C}$ ($273,16\text{ K}$) при тиску $6,1\text{ гПа}$ ($4,58\text{ мм рт. ст.}$).

Температура у градусах Цельсія позначається символом $С^\circ$ і визначається таким чином: $С^\circ = T - T_0$, де $T_0 = 273,16\text{ K}$.

Вимірювання температури за термодинамічною шкалою шляхом прямої її реалізації за допомогою газових термометрів пов'язане із серйозними труднощами, тому була прийнята Міжнародна практична температурна шкала, яка ґрунтується на відтворенні 11 рівноважних станів речовин (водню, неону, кисню, води, цинку, золота та ін.).

6. Еталон одиниці сили світла – кандела. У минулому столітті різні держави використовували різні еталонні джерела одиниці сили світла – свічки.

На Міжнародному конгресі електриків у 1881 р. було прийнято *еталон світла – одиницю Віоля*. За одиницю Віоля визнавалася сила світла, яка випромінювалася квадратним сантиметром поверхні твердіючої платини у нормальному напрямку до цієї поверхні. Пізніше спосіб відтворення одиниці Віоля одержав назву «абсолютного еталона сили світла». У 1889 році Конгресом за практичну одиницю світла була прийнята одна двадцята одиниці Віоля.

З огляду на труднощі реалізації еталона одиниці Віоля, Міжнародний конгрес у 1893 році приймає за еталон лампу Гефнера-Альтенека, а пізніше – керамічні трубки та інші джерела світла.

Лише у 1967 році Генеральна конференція з мір та ваги визначила за одиницю сили світла канделу. Це світло, яке випромінюється з площини перерізом $1/600\,000\text{ м}^2$ повного випромінювача у перпендикулярному до цього перерізу напрямку при температурі твердіння платини і тиску 101 325 Па.

Державний *первинний еталон одиниці світла – кандела* – складається з двох взаємозамінних повних випромінювачів та апаратури вимірювання. Повний випромінювач являє собою тонкостінну трубку з оксиду торію, занурену у розплавлену платину. Нагрівання платини проводиться у високочастотній індукційній печі, а вимірювання сили світла – за допомогою фотоелектричного фотометра.

Середнє квадратичне відхилення результату відтворення та передачі одиниці сили світла державним еталоном не перевищує $2 \cdot 10^{-3}$.

7. Еталон кількості речовини – моль. За еталон кількості речовини прийнятий моль – кількість речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів часток, скільки атомів міститься в 12 г вуглецю-12 (1 моль вуглецю має масу 12 г, 1 моль кисню – 32 г, а 1 моль води – 18 г).

Однією з причин того, що еталон одиниці кількості речовини не створений, є недостатня чіткість визначення цієї одиниці і відсутність методу

її виміру відповідно до визначення. Тим більше, що цю одиницю важко назвати основною, так як її визначення пов'язане з одиницею маси. Цілком можливо, що цю одиницю буде переведено в розряд спеціальних одиниць маси.

3.8. Перспективи розвитку еталонів

З удосконаленням технологій вимірювання стало зрозуміло, що усі еталони, які зберігаються в Парижі, не ідеальні. Поступово вчені доходили думки, що за стандарти основних одиниць варто брати не рукотворні предмети, а більш досконалі зразки, створені природою.

На відміну від старих, нові стандарти є атомними або квантовими, тобто в них «працюють» самі «базові» закони природи.

Поступово шість з семи основних одиниць СІ отримали способи відтворення, для яких не потрібен унікальний еталон, що зберігається десь в одному місці. Теоретично будь-який науковець, який захоче точно (дуже точно) довідатися, наприклад, скільки триває секунда, може взяти міліграм ізотопу *цезію-133* та відрахувати, коли відбудуться 9 192 631 770 періодів випромінювання (до речі, свої атомні стандарти часу встановлені, наприклад, на всіх супутниках GPS).

За останні роки отримані високі результати точності і надійності еталонів, які створені на основі використання квантових ефектів, що дозволяє припустити можливість створення нових еталонів у недалекому майбутньому.

З використанням квантових ефектів було створено сучасний еталон ампера і ома. Квантові еталони характеризуються високим ступенем стабільності значень похибки відтворення одиниць величин.

За допомогою нових методів та засобів вимірювань уточнюються фундаментальні фізичні константи, тому точність квантових еталонів буде зростати.

Вчені вважають, що квантові еталони можна буде вважати «вічними заходами», так як здатність відтворення одиниць ФВ у таких еталонів не схильна до впливу зовнішніх умов, географічного місцезнаходження і часу.

Якщо буде створений еталон маси на основі можливостей ядерної фізики, то багато існуючих еталонів перейдуть у розряд «вічних», оскільки розмірності їх величин так чи інакше пов'язані з масою. У таких умовах зміниться і система повірки та калібрування, яка прив'язана до державних

еталонів, тобто відбудеться її децентралізація, що забезпечить значний економічний ефект.

Очікується поява можливості створення порівняно недорогих квантових еталонів і робочих ЗВ на основі практичного використання ефекту високотемпературної надпровідності, що послужить початком нового періоду в розвитку фундаментальної і практичної метрології.

Еталон (одиниці фізичної величини) – засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини та передавання її розміру відповідним засобам вимірювальної техніки, що стоять нижче за повірочною схемою, офіційно затверджений як еталон[2]

Усі основні одиниці фізичних величин відтворюються з найвищою точністю за допомогою міжнародних еталонів відповідних одиниць і зберігаються у Міжнародному бюро мір та ваги у спеціальних лабораторіях у місті Севр поблизу Парижа. Програмою діяльності цього бюро передбачені систематичні зіставлення національних еталонів провідних метрологічних лабораторій різних держав з міжнародними еталонами та між собою.

Основне призначення еталонів – бути матеріальною базою для відтворення та збереження одиниць фізичних величин.

Новий Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», що набрав чинності 2016 року, дає таке визначення еталона: це реалізація визначення даної величини із встановленим значенням величини та пов'язаною з ним невизначеністю вимірювання, що використовується як основа для порівняння. Про метрологію та метрологічну діяльність: Верховна Рада України; Закон від 05.06.2014 № 1314 –VII

Запитання для самоконтролю до теми 2

1. Навести та пояснити основні поняття про вимірювання.
2. Що значить забезпечення єдності вимірів?
3. Які види вимірювань Ви знаєте?
4. Які методи вимірювань Ви знаєте?
5. Поясніть класифікацію засобів вимірювальної техніки
6. Метрологічні показники засобів вимірювання.
7. Як калібруються засоби вимірювальної техніки
8. Що значить «Еталони як засіб вимірювання»?
9. Перспективи розвитку еталонів.

Тема4. Похибки вимірювань

План

- 4.1. Види похибок та причини їх виникнення
- 4.2. Класифікація похибок вимірювання
- 4.3. Оцінка результатів прямих вимірювань
- 4.4. Повірка засобів вимірювань

4.1. Види похибок та причини їх виникнення

Практична корисність будь – якого вимірювання визначається зазначенням його похибки, тобто кількісної характеристики відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної ФВ. Виникнення похибок вимірювань обумовлено впливом різноманітних за фізичною природою факторів, що супроводжують вимірювання. Традиційний аналітичний підхід до визначення похибок полягає в їх поділі на складові, кожна з яких зумовлена певними факторами. Це дозволяє досліджувати джерела складових похибки, проводити необхідні експерименти, в тому числі допоміжні вимірювання, і, як наслідок, визначати властивості похибки та з необхідною точністю оцінити її складові. Знаючи властивості й оцінки складових, можна правильно врахувати їх при оцінці повної похибки, а також за необхідності ввести поправку в результат вимірювання й (або) організувати вимірювальний експеримент так, щоб звести окремі складові, а з ними й повну похибку до допустимого значення. Для підвищення об'єктивності оцінки похибок вимірювань і визначення шляхів їх зменшення, з метою покращання якості вимірювань, необхідно знати джерела (причини) виникнення різних складових повної похибки вимірювань і закономірності їх змінювання.

При вимірюванні ФВ слід чітко розмежувати два поняття: істинні значення ФВ та результати їх вимірювань.

Істинне значення ФВ – це значення, що ідеально відображає властивості об'єкта як у кількісному, так і в якісному відношеннях. Істинні значення не залежать від засобів нашого пізнання і є абсолютною істиною, до якої наближається спостерігач, намагаючись виразити її як числове значення.

Результат вимірювання є продуктом пізнання спостерігача і приблизною оцінкою значення шуканої величини. Результати залежать від

методів вимірювання, технічних засобів, властивостей органів чуття спостерігача, зовнішнього середовища й самих ФВ.

Похибка результатів вимірювання – це число, що показує можливі межі невизначеності значення вимірюваної величини.

Результат вимірювання є продуктом пізнання спостерігача і приблизною оцінкою значення шуканої величини. Результати залежать від методів вимірювання, технічних засобів, властивостей органів чуття спостерігача, зовнішнього середовища й самих ФВ.

Абсолютною похибкою ΔG називається різниця між показанням засобу вимірювань G_u та істинним значенням вимірюваної величини G за відсутності методичних похибок і похибок від взаємодії засобу вимірювань із об'єктом вимірювання:

За формою вираження похибки вимірювання поділяються на абсолютні та відносні.

Абсолютна похибка вимірювання – це похибка вимірювання, виражена в одиницях вимірюваної величини.

Відносна похибка вимірювання – це похибка вимірювання, виражена як відношення абсолютної похибки до виміряного значення:

$$\delta = \pm \Delta G / G_u \cdot 100\%., \quad (4.1)$$

Приведену похибку розраховують по формулі (клас точності приладу для вимірювань):

$$\delta = \pm \Delta G / G_{\text{норм}} \cdot 100\%., \quad (4.2)$$

де $G_{\text{норм}}$ – нормативне значення вимірюємої величини. Її приймають рівною:

а) кінцевому значенню шкали приладу, якщо нульова відмітка знаходиться на краю або зовні шкали;

б) підсумку кінцевих значень шкали без урахування знаків, якщо нульова відмітка знаходиться всередині шкали;

в) довжині шкали, якщо шкала не рівномірна.

Клас точності приладу встановлюється при його повірці та є нормуємою похибкою, яка вираховується за формулою:

$$\gamma = \pm \Delta G / G_{\text{норм}} \cdot 100\%, \text{ якщо } \Delta G_m = \text{const} , \quad (4.3)$$

де ΔG_m – невелика можлива абсолютна похибка приладу;

G_k – кінцеве значення межі вимірювання приладу; c та d – коефіцієнти, які враховують конструктивні параметри та властивості вимірювального механізму приладу.

Наприклад, для вольтметра зі сталою відносною похибкою: $\delta_m = \pm c$.

Відносна та приведена похибка пов'язані залежностями:

а) для будь – якого значення приведеної похибки:

$$\delta = \pm \gamma_m \cdot G_{\text{норм}} / G_u, \quad (4.4)$$

$$\delta = \pm \gamma \cdot G_{\text{норм}} / G_u;$$

б) для найбільшої приведеної похибки:

$$\delta = \pm \gamma_m \cdot G_{\text{норм}} / G_u, \quad (4.5)$$

Вираження похибок вимірювання в абсолютній або відносній формі обумовлено історичними традиціями, які склалися в певних галузях вимірювань. Ці традиції часто знаходять закріплення в нормативних документах.

За джерелами виникнення похибки вимірювання бувають інструментальні, методичні та особисті (похибки оператора).

Інструментальна похибка – складова похибки вимірювання, зумовлена властивостями засобу вимірювання. Ця похибка в свою чергу може містити кілька компонентів, зокрема, похибку засобу вимірювання та похибку обумовлену взаємодією засобу вимірювання з об'єктом вимірювання.

Методична похибка – складова похибки вимірювання, обумовлена недосконалістю методу вимірювання або невідповідністю об'єкта вимірювання його моделі, прийнятій для вимірювання.

Похибка оператора – складова похибки вимірювання, обумовлена індивідуальними властивостями оператора.

Дана класифікація зручна для ідентифікації компонентів повної похибки вимірювання з метою її оцінювання.

За закономірностями виникнення та прояву розрізняють систематичні та випадкові похибки.

Систематична похибка – складова загальної похибки вимірювання, яка залишається постійною або закономірно змінюється під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини.

Випадкова похибка – складова загальної похибки вимірювання, яка змінюється випадковим чином (як за знаком, так і за величиною) під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини. Таким чином, повна похибка вимірювання є сумою систематичної та випадкової похибок. Випадкові похибки можна виявити шляхом проведення повторних вимірювань, оскільки вони призводять до мінливості їх результатів. В цьому відношенні

небезпечнішими є систематичні похибки, оскільки вони часто лишаються непоміченими.

Якщо змінну систематичну похибку ще можна виявити за результатами повторних вимірювань методами дисперсійного аналізу або інженерними методами, то не існує математичних методів для виявлення постійних систематичних похибок. Постійні систематичні похибки можуть бути виявлені в результаті ретельного аналізу вимірювальної процедури (методики вимірювання) або експериментально в результаті спеціальних досліджень.

Класифікація похибок за закономірностями виникнення та прояву використовується:

1. Під час розрахунку характеристик похибки вимірювання. В залежності від того, до систематичних чи випадкових відносяться ті чи інші похибки, використовуються різні методи їх сумування.

2. Під час вибору способів зменшення повної похибки, якщо вона перевищує прийнятне значення. Способи усунення, врахування або зменшення похибки кінцевого результату вимірювання залежать також від того, до якої групи – систематичних чи випадкових похибок – відносяться ті чи інші компоненти повної похибки вимірювання.

В окрему групу слід виділити надмірні похибки.

Надмірна похибка – похибка вимірювання, яка істотно перевищує очікувану за даних умов похибку.

Результати, що містять надмірну похибку, називаються промахами. Такі результати необхідно виявляти та вилучати.

Характеристики похибок вимірювання. Використання оцінок похибок пов'язане з певними проблемами. По – перше, доволі часто в зв'язку з відсутністю еталонів, мір фізичних величин належної точності чи точніших методик прийнятне наближення до істинного значення (дійсне значення) є недоступним. По – друге, експериментальне оцінювання похибок може бути неприйнятним економічно через великі затрати на постановку відповідного експерименту. І, нарешті, якщо похибка має істотну випадкову складову, приписування оцінки похибки, одержаної під час певного вимірювання, результатам інших вимірювань є некоректним в силу того, що значення їх похибок можуть значно відрізнитися.

З врахуванням того, що похибка вимірювання має випадкову складову, тобто є випадковою величиною, найбільш повно охарактеризувати похибку

вимірювання можна за допомогою її закону розподілу. Однак встановлення виду закону розподілу вимагає значних затрат ресурсів та часу. Тому на практиці для опису похибок найчастіше використовують певні характеристики, які можуть бути оцінені за менших затрат.

Характеристики похибок вимірювання поділяються на **точкові та інтервальні**.

Точковою характеристикою похибки є її середнє квадратичне (стандартне) відхилення. Стандартне відхилення виражається одним числом, якому на числовій осі відповідає точка. Тому цей параметр і отримав назву точкової характеристики.

Інтервальна характеристика задається у вигляді границь, в яких похибка знаходиться з певною ймовірністю $P_{\%}$. Самі границі називають довірчими границями похибки, а вказану ймовірність – довірчою ймовірністю. Оскільки границі обмежують на числовій осі певний інтервал значень, який називають довірчим інтервалом, цю характеристику і називають інтервальною.

Ширина довірчого інтервалу залежить від значення довірчої ймовірності – при її зростанні ширина також зростає. Значення $P_{\%}$ повинно бути достатньо високим, оскільки це визначає довіру до результату, однак, в той же час, необхідно забезпечити, щоб довірчий інтервал був не занадто широким, оскільки тоді він буде непридатним для практичного використання. За умовчанням для технічних вимірювань приймається $P_{\%}=0,95$. Для особливо відповідальних вимірювань, які мають важливе значення для життя чи здоров'я людей, довірча ймовірність може бути 0,99 і вище.

Приклад. Нехай при вимірюванні напруги одержали значення $U=150$ В з похибкою 2 В при $P=0,95$. Це означає, що істинне значення похибки вимірювання з ймовірністю 0,95 знаходиться в межах від -2 до $+2$ В і існує ймовірність $1 - 0,95=0,05$ виходу похибки за вказані границі. Права границя цього інтервалу – $(150+2)$ В=152 В, ліва границя – $(150 - 2)$ В=148 В. Таким чином, істинне значення напруги з ймовірністю 0,95 лежить в діапазоні від 148 до 152 В. В той же час існує ймовірність 0,05 знаходження істинного значення напруги за межами вказаного інтервалу.

Якщо результат вимірювання є кінцевим, придатним для вирішення конкретної технічної задачі і не буде використовуватися спільно з іншими результатами для розрахунку величин, функціонально з ними пов'язаних,

користуються переважно інтервальними характеристиками похибки. У випадку, коли результат вимірювання буде використовуватися спільно з іншими результатами вимірювань для розрахунку величин, які з ними функціонально пов'язані, переважно використовують точкові характеристики.

Характеристики похибки можуть бути оцінені як статистичними, так і нестатистичними методами.

При імітаційному методі перевірки засобу вимірювання замість шкали N підставляється нормоване значення шкали, яке відповідає градувальним характеристикам.

Варіацією називається найбільша різниця між двома показниками ЗВ, коли одне й те саме дійсне значення вимірюваної величини досягається в результаті її збільшення чи зменшення:

Крім того, похибки засобів вимірювань поділяються на *статичні й динамічні*.

Статичні похибки мають місце при вимірюванні величини після закінчення перехідних процесів в елементах та перетворювачах ЗВ.

Динамічні похибки з'являються при вимірюванні змінних величин і зумовлені інерційними властивостями ЗВ.

Статичні похибки, у свою чергу, поділяються на випадкові та систематичні. При технічних вимірюваннях ФВ як на процес вимірювання, так і на вимірювану величину діють чинники, виникнення яких має стохастичний характер за непередбаченої інтенсивності. Чинники впливу як з'являються, так і зникають несподівано, їх виникнення неможливо передбачити у заданому інтервалі часу.

Загалом **випадкові похибки** слід розглядати як випадкову функцію часу вимірюваної величини та зовнішніх чинників. Особливість випадкової похибки полягає у тому, що вона змінюється випадково при повторних визначеннях однієї й тієї самої величини. Крім того, не завжди можна встановити причину виникнення випадкових похибок та передбачити їх інтенсивність. При розробці нових засобів вимірювання інтенсивність появи більшості чинників цієї групи вдається виявити і звести до загального рівня, так що вони більш – менш однаково впливають на формування випадкової похибки. Проте деякі з них можуть проявлятися надмірно (наприклад, зміна напруги у мережі електроживлення) і призводити до того, що похибка перевищуватиме допустимі межі. Такі похибки у складі випадкових

називаються грубими. До них слід віднести і похибки з вини спостережача, зумовлені його станом: правильність за шкалою, точність записів результатів вимірювань тощо.

Систематичні похибки у загальному випадку є функцією вимірюваної величини, чинників впливу (температури, вологості та ін.), конструктивних характеристик ЗВ та методів вимірювань. Їх особливість полягає в тому, що вони або постійні за величиною, або ж закономірно змінюються при повторних вимірюваннях однієї й тієї самої величини.

Систематична похибка ЗВТ залишається постійною або ж закономірно змінюється, тому її завжди можна врахувати при кінцевих результатах вимірювання.

Систематичні похибки визначаються при повірках та атестаціях зразкових та робочих ЗТВ, а в результатах вимірювання враховуються як поправки з протилежним знаком. Поправка у кожній цифровій точці шкали чисельно дорівнює систематичній похибці і обернена до неї за знаком.

Систематичні похибки як функцію вимірюваної величини можна показати у вигляді суми похибок схеми, яка визначається самою структурою ЗВ, та технологічних похибок, обумовлених похибками виготовлення елементів цього засобу.

Похибки схеми і технологічні похибки можна розглядати як систематичні лише при вимірюванні постійної вимірюваної величини за допомогою одного зразка ЗВ. У загальній же масі вимірювань ФВ за допомогою багатьох ЗВ одержані систематичні похибки слід відносити до класу випадкових.

Похибки схеми і технологічні похибки суттєво і принципово відрізняються. Якщо перші впливають на характер зміни по шкалі сумарної похибки всіх ЗВ, то технологічні похибки індивідуальні для кожного зразка ЗВТ, тобто їх значення для кожного приладу в одній і тій самій точці різні.

Слід пам'ятати, що характеристики елементів ЗВТ змінюються при їх експлуатації в екстремальних умовах або агресивному середовищі. Це відбувається з двох причин: природні процеси старіння та зносу елементів ЗВ, навіть якщо їх експлуатація відбувається в умовах, близьких до умов градування. Ці причини можна віднести до інструментального виявлення нестабільності характеристик.

Крім того, необхідність регламентування **додаткових похибок** може зумовлюватися суттєвими змінами зовнішніх умов експлуатації ЗВ порівняно

з умовами проведеного градування. Цю причину можна вважати методичною, вона зумовлена мінливістю навко-лишнього середовища.

Всі ці обставини спричиняють зміну відхилення статичної характеристики у той чи інший бік від градуовальної характеристики (рис. 4.1). Якщо ширина смуги зростає пропорційно зростанню вхідної величини x , а при $x = 0$ вона також дорівнює нулю, то така похибка називається мультиплікативною, тобто такою, що розрахована шляхом множення, або похибкою чутливості, незалежно від того, випадкова ця похибка чи систематична. Мультиплікативна похибка описується рівнянням:

$$\Delta m = f(x), \quad (4.6)$$

Смуга, обмежена прямими S_x' та S_x'' (рис. 4.1,а), є областю невизначеності і характеризується похибкою чутливості.

Адитивною називається похибка, яка має сталі значення по всій шкалі (рис. 4.1, б).

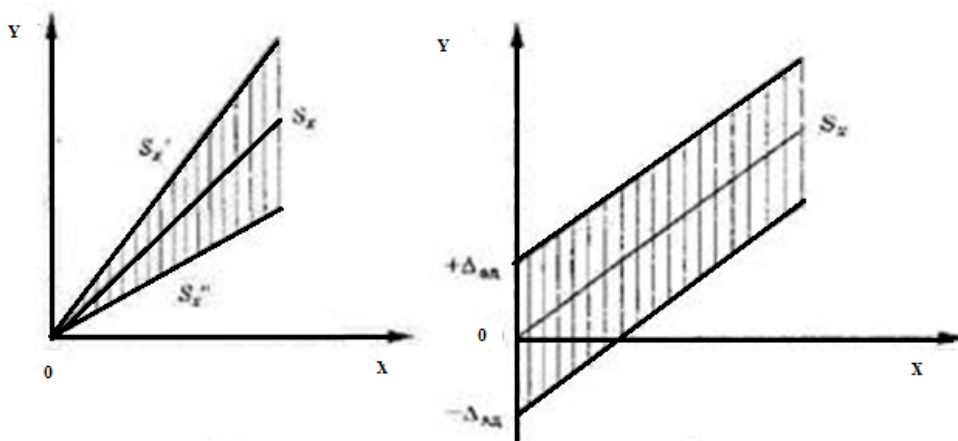


Рис.4.1. – Похибки засобів технічних вимірювань: а – мультиплікативна, б – адитивна.

Значення похибок ЗВ установлюється відповідно до стандартів і вимог при нормальних умовах їх використання, а також при відхиленні впливових величин від нормальних значень. Під нормальними розуміють такі умови використання ЗВ, за яких величини, що впливають на процес вимірювання (температура, вологість, тиск, частота, напруга, зовнішні магнітні поля, вібрація тощо), мають нормальні значення. Останні встановлюються стандартами або вказуються у технічних умовах для відповідних ЗВ як номінальні значення з відхиленнями. Наприклад, температура повинна становити $20 \pm 2^\circ\text{C}$; тиск – $101\,325\text{ Па}$; вологість – не перевищувати 80 %; напруга – $220 \pm 10\text{ В}$ та ін.

Відповідно до стандарту, нормальні умови застосування ЗВТ – це умови, за яких величини, що виявляють зовнішній вплив, мають нормальні значення або перебувають у межах нормального інтервалу значень. Похибка, властива засобам технічного вимірювання, що працюють у нормальних умовах використання, називається основною і нормується межами допустимої основної похибки. Тільки тоді, коли основна похибка не перевищує допустимих меж, засіб вимірювальної техніки допускається до використання за призначенням.

Межі допустимої основної похибки засобів технічних вимірювань задаються у вигляді абсолютних, відносних та приведених похибок.

Основна похибка засобу вимірювання задається формулою, за якою визначаються межі допустимої абсолютної похибки:

$$\Delta = \pm a, , \quad (4.7)$$

або межі приведеної відносної основної похибки:

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X_H} \cdot 100\%, , \quad (4.8)$$

де Δ – межа допустимої основної абсолютної похибки;

δ – межа приведеної допустимої основної похибки %;

X_H – номінальне значення вимірюваної величини (розмах шкали приладу).

Додатковою називається похибка, властива засобам вимірювальної техніки, які використовуються для вимірювання за умови відхилення впливових величин від їх нормальних значень.

Основні та додаткові похибки визначаються межами допустимих основних та додаткових похибок і задаються формулами або ж встановлюються за таблицями граничних допустимих абсолютних та приведених похибок для різних номінальних значень і впливових величин.

Клас точності – узагальнена характеристика засобу вимірювальної техніки, що визначається границями його допустимих основних і додаткових похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на його точність, значення яких регламентуються стандартами на окремі види засобів вимірювань.

4.2. Класифікація похибок вимірювання

Похибки вимірювань розрізняють за такими ознаками: за джерелом виникнення; за закономірністю або характером змінювання (в часі або за

ансамблем); за формою або способом відображення кількісних характеристик похибки вимірювань (рис. 4.2).

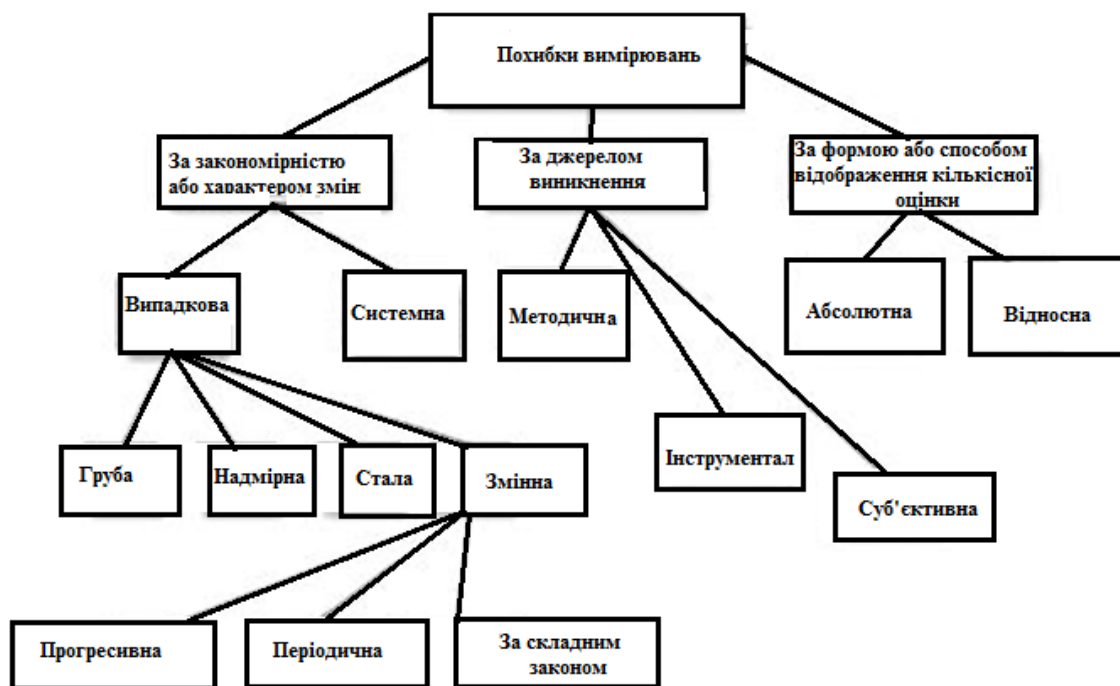


Рис. 4.2. Класифікація похибок вимірювань за джерелом виникнення

Цілоком природно виділити складові похибки та їх джерела від-повідно до основних структурних елементів процесу вимірювання. Виходячи з цього, як джерела похибок вимірювань, слід розглядати метод вимірювання і засіб ЗВТ, а також оператора (суб'єкта). Згідно з цим виділяють методичну, інструментальну та суб'єктивну складові похибки вимірювань.

Методична складова похибки вимірювання у загальному випадку зумовлена недосконалістю методу вимірювання, вона не залежить від властивостей ЗВТ.

Конкретизуємо джерела методичних похибок для прямих і непрямих (опосередкованих, сукупних і сумісних) вимірювань.

До найбільш поширених методичних похибок прямих вимірювань належать:

1. **Похибка, обумовлена неадекватністю фізичної моделі об'єкта вимірювання (ОВ) реальному об'єкту та задачі вимірювання.** Експе-риментатор мусить чітко відрізнити фактично вимірювану величину за прийнятою фізичною моделлю ОВ від тієї ФВ, що реально відтворює досліджувану властивість ОВ і підлягає вимірюванню.

Наприклад, при вимірюванні на виході будь – якого ОВ змінної напруги її форма прийнята синусоїдною, у той час як реальний сигнал не є

синусоїдним і містить вищі гармоніки. Тому якщо від-повідно до прийнятої фізичної моделі ОВ для вимірювання амплітуди або змінної напруги на виході ОВ використати вольтметр, призначений для вимірювання синусоїдної напруги, то в результат вимірювання буде внесена методична похибка, обумовлена дією вищих гармонік, наявних у реальному сигналі ОВ.

Невідповідність прийнятої фізичної моделі ОВ, що називають пороговою невідповідністю, викликає одну з принципово неусувних складових методичної похибки, яка обмежує досягнутої точності вимірювання. Це спричиняється тим, що фізична модель ОВ визначає вимірювану величину, а звідси – вибір методу вимірювання і ЗВТ.

2. Похибка, яка зумовлена зміною залежності між вимірюваною і проміжною величинами, якщо при вимірюваннях використовується проміжне перетворення ЗВТ.

3. Похибка передавання розміру вимірюваної величини від ОВ до ЗВТ, тобто фізичне з'єднання ЗВТ з ОВ, не завжди здійснюється так, щоб розмір вимірюваної величини був однаковий на виході ОВ і на вході ЗВТ. Наприклад, таку похибку можуть вносити з'єднувальні проводи між ОВ і ЗВТ.

До *характерних методичних похибок*, які є специфічними для непрямих вимірювань, належать:

1. Похибка обчислювань, у тому числі похибка алгоритмів або програм обчислювань.

2. Похибка, обумовлена тим, що функції (функціонали) обчислюються, як безперервні, а реально вони є дискретними (вимірювання здійснюються при дискретних значеннях ФВ-аргумента).

Відмітною особливістю методичних похибок вимірювань є те, що вони, як правило, неконкретні, і тому не можна одержати будь-яких узагальнених кількісних оцінок.

Враховуючи це, методичні похибки звичайно не нормуються і не вказуються в технічній документації, а повинні оцінюватися експериментатором при реалізації вибраного методу вимірювань з урахуванням конкретних умов експлуатації ЗВТ. Така оцінка досить складна і часто потребує ґрунтовного експериментального дослідження прийнятого методу вимірювань. Якщо метод апробований протягом тривалого часу, то його похибки можуть бути встановлені і записані в паспорт методу. Складання подібних атестаційних паспортів похибок стандартних методів вимірювань є одним із важливих завдань сучасної метрології.

Інструментальна (приладова, апаратурна) складова похибки вимірювання обумовлена властивостями (або недосконалістю) ЗВТ, які використовуються при вимірюванні, що призводить до різних складових похибки.

Суб'єктивна (або особиста) складова похибки вимірювання залежить від індивідуальних властивостей експериментатора (суб'єкта), що виконує вимірювання, а точніше, від його психофізіологічних якостей, зокрема, від недосконалості органів чуттів, які беруть участь у визначенні результату вимірювання (зору, слуху, швидкості реакції на сигнал), від здатності до концентрації уваги, від ступеня стомленості і т. ін. Велику роль відіграє кваліфікація експериментатора.

Суб'єктивна похибка вимірювання характерна тільки для аналогових вимірювальних приладів. Вона має два різновиди.

Першим різновидом суб'єктивної похибки вимірювань є *похибка відліку*, яка обумовлена округленням показників під час їх відліку оператором зі шкали аналогового вимірювального приладу. Вона проявляється в тому, що однаковий показник приладу, який, наприклад, дорівнює 84,3 поділки, один оператор зчитує правильно, другий – як 84,0, третій – як 84,5 і т. д.

Другим різновидом суб'єктивної похибки вимірювань є *похибка паралакса*, обумовлена взаємним розташуванням ока експериментатора, стрілки вказівника і шкали аналогового вимірювального приладу.

Очевидно, такі похибки не можуть бути заздалегідь передбачені і вказані в технічній документації аналогових вимірювальних приладів. У цифрових вимірювальних приладах операція округлення виконується автоматично, а похибка округлення, що виникає при цьому, називається похибкою квантування, вона нормується і вказується в технічному описі приладу.

Зменшення або виключення суб'єктивної складової похибки вимірювання досягають застосуванням спеціальних типів шкал, наприклад дзеркальних, використанням цифрового відліку й авто-матизацією одержання результату вимірювання.

Таким чином, суб'єктивні похибки вимірювань поки що не можуть бути оцінені кількісно, а тому вони не входять у математичну модель повної похибки вимірювань. Їх треба зменшувати або виключити, але про них слід завжди пам'ятати під час відліку оператором показників зі шкали аналогового вимірювального приладу.

2. Чинники постійні або такі, що закономірно змінюються у процесі вимірювання ФВ. До них належать методичні похибки, зміщення стрілки приладу та недосконалість елементів (пружних) ЗВ. Складові сумарної похибки, що виникають під дією чинників другої групи, – систематичні похибки вимірювань.

Історично склалося так, що усі засоби вимірювань, крім кутових та довжин, поділені на класи точності.

Той чи інший клас точності присвоюється засобам вимірювальної техніки на основі визначеної для них основної похибки та способу її виявлення. Якщо основна похибка виражена в одиницях вимірюваної величини за формулою (4.8), то клас точності позначається порядковим номером з ряду чисел. ЗВ з більшою межею основної похибки присвоюється клас точності з більшим порядковим номером, а з меншою межею похибки – менший номер. Клас точності ЗВ характеризує їхні точнісні властивості, але не є безпосереднім показником точності вимірювання, оскільки точність залежить від методу, умов проведення вимірювань, розмаху шкали приладу та ін. Наприклад, якщо межі допустимої основної похибки становлять $\pm 0,5$ дБ, то клас точності позначається так: кл. 0,5 дБ.

ЗВ, межі допустимих основних похибок яких задані у вигляді приведених похибок за формулою (4.8), присвоюються класи точності з такого ряду чисел: $K = [1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0]10^p$; де $p = 1; 0; -1; -2; -3...$

Класи точності відповідно до стандарту, як правило, виводяться на шкалу приладів. Промислові прилади мають такі класи точності:

0, 5; 1,0; 1,5; 2,5; 3; 4. Для окремих видів ЗВ вибирається ряд чисел не більше 5.

При вимірюванні величин у відсотках клас точності на шкалі приладу обводиться колом.

Для встановлення похибок ЗВ він періодично повіряється зразковими засобами, які за класом точності на декілька класів вищі.

Причини виникнення похибок: недосконалість методів вимірювання, технічних засобів, органів чуттів спостерігача, зміна умов проведення експерименту. Зміна умов проведення досліджень може впливати на ФВ, технічні засоби і самого спостерігача.

Кожна із наведених причин виникнення похибок зумовлена багатьма чинниками, під впливом яких формується загальна похибка вимірювання. Їх можна об'єднати у дві великі групи.

1. Чинники, що з'являються нерегулярно і зникають несподівано або проявляються з непередбачуваною інтенсивністю. До них належать: перекося елементів приладів за їх напрямними, нерегулярні зміни моментів в опорах, зміна зовнішніх умов та умов навколишнього середовища, послаблення уваги спостерігача тощо. Складова сумарної похибки, яка виникає під впливом цих чинників, – випадкові похибки вимірювань.

2. Чинники постійні або такі, що закономірно змінюються у процесі вимірювання ФВ. До них належать методичні похибки, зміщення стрілки приладу та недосконалість елементів (пружних) ЗВ. Складові сумарної похибки, що виникають під дією чинників другої групи, – систематичні похибки вимірювань.

4.3. Оцінка результатів прямих вимірювань

Залежно від розв'язуваної задачі, прямі вимірювання можуть проводитися з одноразовими і багаторазовими спостереженнями. Прямі одноразові вимірювання є найбільш розповсюдженими у практиці технічних вимірювань, оскільки точність їх результатів у звичайних умовах, як правило, достатня, і водночас вони відрізняються простотою вимірювального експерименту, високою продуктивністю (числом вимірювань за одиницю часу) та незначними витратами, для їх проведення не ставляться високі вимоги до кваліфікації експериментатора. За цими показниками вони значно перевищують інші методи вимірювань. Прямі багаторазові вимірювання застосовуються у тому разі, коли необхідно забезпечити підвищену точність результатів вимірювань, яка досягається за рахунок зменшення випадкової складової похибки вимірювань усередненням (статистичною обробкою) результатів спостережень вимірюваної величини того самого розміру. Їх доцільно проводити тоді, коли випадкова похибка результату вимірювань є переважною порівняно із систематичною. Багаторазові вимірювання відрізняються підвищеними складністю, трудомісткістю і витратами, тому їх доцільність мусить бути переконливо обґрунтованою. Найчастіше вони застосовуються, наприклад, при виконанні наукових експериментів і проведенні метрологічних робіт. Особливості в організації вимірювального експерименту при виконанні одноразових і багаторазових прямих вимірювань визначають відмінність у методиках оцінки їх результатів і похибок.

Для прямих одноразових вимірювань характерні дві головні особливості:

1. Із множини можливих відліків результату вимірювання використовується лише один.

2. Потрібен певний обсяг апріорної інформації та її ретельний аналіз.

Ця інформація стосується всіх компонентів процесу вимірювання: властивостей фізичної моделі об'єкта вимірювання, методу вимірювання і ЗВТ, умов виконання вимірювання, кваліфікації експериментатора. Аналіз усієї цієї апріорної інформації виконується перед проведенням прямих одноразових вимірювань, і від його повноти залежить вірогідність результату вимірювання. Основні етапи цього аналізу:

1. Слід з'ясувати фізичну сутність досліджуваної властивості об'єкта вимірювання, звернувши особливу увагу на вимірюваний параметр.

2. Визначити впливні величини і заходи, спрямовані на зменшення їх впливу (термостатування, екранування або компенсація електричних і магнітних полів тощо).

3. Прийняти рішення на користь тієї чи іншої методики виконання вимірювань.

4. Вибрати ЗВТ, при цьому переконатися у справності, в тому числі метрологічній, вибраного ЗВТ і наявності вірогідної інформації про його НМХ.

5. Оцінити похибку взаємодії ЗВТ з ОВ та динамічну похибку.

6. Дослідити застосований метод вимірювання з метою оцінки методичної похибки.

7. Оцінити можливу похибку експериментатора, якщо вона істотна.

Вибір методу вимірювання і ЗВТ проводиться так, щоб вилучити або зменшити до найменших значень методичну похибку, похибку взаємодії і динамічну похибку, тобто щоб похибка вимірювання визначалася тільки статичною похибкою ЗВТ (основною і додатковою, якщо вона є, складовими).

Наведені етапи підготовки до виконання вимірювань у якійсь мірі справедливі і для інших методів вимірювань, але особливої ретельності вони потребують при одноразових вимірюваннях, де роль одного відліку результату вимірювання надзвичайно висока.

Результат одноразового вимірювання є випадковим числом, і жоден з його окремих відліків не дає повного уявлення про таке число, а отже, і про вимірюваний параметр. Тому вже на етапі одержання відліку ЗВТ (тобто результату вимірювання) виникає дефіцит вимірювальної інформації, що

деякою мірою може бути поповнений тільки за рахунок апріорної інформації. І в цьому процесі багато що залежить від того, яка апріорна інформація використовується. Практично при вимірюваннях мають місце два випадки:

1. Є тільки інформація про клас точності ЗВТ, що використовується, і умови виконання вимірювань.

2. На підставі накопиченого досвіду подібних вимірювань можуть бути відомі закон розподілу ймовірностей результатів вимірювань даної ФВ, характеристики не вилучених систематичних і випадкових складових похибки вимірювань.

У першому випадку при оцінці похибки вимірювань ураховуються розсіяння (розкид) результатів вимірювань і поправка, обумовлені лише властивостями застосованого ЗВТ. Границі, в яких знаходиться значення вимірюваної величини, встановлюються через єдиний відлік показників ЗВТ шляхом обчислення абсолютної інструментальної похибки результату вимірювання. Для її оцінки визначають границі допустимої абсолютної основної похибки (за класом точності) і додаткових похибок (за даними в технічній документації), які об'єднують за тим чи іншим правилом і одержують статичну похибку ЗВТ. Звичайно, ця похибка і береться за границі довірчого інтервалу результату вимірювання. Проте для підвищення їх вірогідності слід оцінити (і за необхідності врахувати) останні дві складові інструментальної похибки вимірювань (динамічну похибку та похибку взаємодії), а також методичну похибку.

Постійно зростаючі вимоги до точності прямих вимірювань задовольняються не тільки за рахунок підвищення точності заново створених ЗВТ, але й використанням більш ефективних методів обробки результатів вимірювань, наприклад статистичної обробки багаторазових вимірювань (або прямих вимірювань із багаторазовими спостереженнями).

Головна особливість багаторазових вимірювань, на відміну від одноразових, полягає в одержанні і використанні великого обсягу апостеріорної вимірювальної інформації. Це не означає, що необхідність в аналізі апріорної інформації відпадає. Такий аналіз обов'язково передуює багаторазовому вимірюванню і має ту саму мету, що й при одноразових вимірюваннях, але з тією відмінністю, що при багаторазових вимірюваннях розподіл ймовірностей їх результатів встановлюється експериментально. Визначення результату і похибки вимірювань з багаторазовими спостереженнями ґрунтується на статистичних оцінках, або навпаки,

статистичні оцінки одержують на підставі багаторазових рівноточних вимірювань. Методика обробки результатів прямих вимірювань із багаторазовими незалежними спостереженнями включає в себе наступні основні етапи:

1. Аналіз апріорної інформації і підготовку до проведення багаторазових вимірювань.

2. Виконання вимірювальної процедури. Експериментально одержують «п» незалежних результатів спостережень вимірюваного розміру ФВ. Вимірювальна процедура може бути організована по – різному. Якщо зміною вимірюваної величини в часі можна знехтувати, то всі результати спостережень найпростіше одержати шляхом багаторазових (послідовних у часі) вимірювань даної величини тим самим ЗВТ. Якщо ж із апріорної інформації можна зробити висновок, що за час такої процедури вимірювана величина буде істотно змінюватися, то її вимірюють одночасно (паралельно) декількома ЗВТ, кожний з яких дає один із незалежних результатів спостережень. У цьому випадку дещо порушується одна з умов рівноточності вимірювань, але це вимушений захід, і вживається він досить рідко. А зменшити ефект від використання не одного, а декількох ЗВТ можна їх ретельним попереднім відбором.

Обробка результатів декількох серій спостережень. Інколи за умовами вимірювального експерименту багаторазові спостереження (вимірювання) ФВ незмінного розміру проводяться в декілька етапів, розтягнутих у деякому тривалому інтервалі часу, або серії (групи) вимірювань цієї ФВ одержують за різних умов, із використанням різних ЗВТ і залученням для проведення експериментів фахівців різної кваліфікації. Очевидно, точність окремих серій результатів спостережень, одержаних у процесі проведення таких експериментів, буде неоднаковою. Серії називаються однорідними, якщо їх результати спостережень (значення фізичної величини) підлягають однаковому закону розподілу ймовірностей і задовольняють критерій однорідності. У протилежному випадку серії спостережень вважаються неоднорідними. В подальшому допускається, що результати спостережень усіх серій підлягають нормальному закону розподілу.

Задача об'єднання результатів декількох серій спостережень. Задача обробки результатів декількох серій спостережень (вимірювань) полягає в тому, щоб, використовуючи увесь масив експериментальних

даних, одержати найкращу оцінку істинного значення вимірюваної величини. Така задача називається об'єднанням результатів спостережень. Важливо відрізнити ситуації, за яких об'єднання результатів спостережень є виправданим, від тих, за яких воно недопустиме. Так не має рації задача об'єднання результатів спостережень різних за розміром ФВ.

Задача об'єднання результатів спостережень розв'язується в два етапи:

1. Здійснюється перевірка однорідності і рівноточності серій результатів спостережень між собою. Вона є обов'язковою, оскільки визначає вибір методу сумісної обробки результатів декількох серій спостережень. Перевірка зводиться до оцінки допустимої різниці між середніми арифметичними значеннями (перевірка на однорідність) і СКВ (перевірка на рівноточність, або на розкид, розсіювання) результатів вимірювань окремих серій. Якщо обидва види відмінностей, які оцінюються за певними критеріями, допустимі, то ці серії вимірювань можна розглядати як єдину сукупність експериментальних даних і статистично оброблювати як прямі вимірювання з багато-разовими спостереженнями.

2. Якщо проведена перевірка на однорідність показала недопустимість цього припущення, то необхідно виконати такі дві операції.

По-перше, переконатися у тому, що в процесі проведення експерименту розмір вимірюваної ФВ не змінювався.

По-друге, оцінити границі систематичних похибок, які мали місце при одержанні кожної серії результатів спостережень. Використовуючи оцінки границь систематичних похибок, слід ввести відповідні поправки в експериментальні дані, внаслідок чого різниця між середніми арифметичними значеннями серій стає допустимою, а одержаний ряд виправлених результатів вимірювань – однорідним.

4.4. Повірка засобів вимірювань

Повірці підлягають ЗВТ (табл. 4.1), що перебувають в експлуатації, випускаються з серійного виробництва, ремонту та у продаж, видаються напрокат, на які поширюється державний метрологічний нагляд, а саме ті, які застосовують під час:

- робіт із забезпечення охорони здоров'я;
- робіт із забезпечення захисту життя та здоров'я громадян;
- контролю якості та безпеки продуктів харчування і лікарських засобів;

- контролю за станом навколишнього природного середовища;
- контролю безпеки умов праці;
- геодезичних і гідрометеорологічних робіт;
- торговельно-комерційних операцій і розрахунків між покупцем (споживачем) і продавцем (постачальником, виробником, виконавцем), у тому числі у сферах побутових і комунальних послуг, телекомунікаційних послуг та послуг поштового зв'язку;
- податкових, банківських і митних операцій;
- обліку енергетичних і матеріальних ресурсів (електричної і теплової енергії, газу, води, нафтопродуктів тощо), за винятком внутрішнього обліку, який ведуть підприємства, організації та фізичні особи – суб'єкти підприємницької діяльності;
- робіт, пов'язаних із державною реєстрацією земельних ділянок і нерухомого майна;
- робіт із забезпечення технічного захисту інформації, необхідність якого визначено законодавством;
- робіт, що виконують за дорученням органів прокуратури та правосуддя;
- робіт з оцінювання відповідності продукції, процесів, послуг;
- реєстрації національних і міжнародних спортивних рекордів;

Повіріці також підлягають:

- вихідні і робочі еталони метрологічних центрів та територіальних органів;
- вихідні еталони підприємств і організацій;
- ЗВТ, що застосовують під час державних випробовувань, державної метрологічної атестації та повірки ЗВТ, а також для калібрування ЗВТ для інших підприємств, організацій, а також для фізичних осіб.

Повірку ЗВТ проводять територіальні органи, уповноважені на її проведення. Якщо територіальні органи за відсутністю відповідних еталонів не можуть провести повірку окремих типів ЗВТ, то повірку цих ЗВТ проводять наукові метрологічні центри, уповноважені (акредитовані) на її проведення

Повірку проводять посадові особи територіальних органів і наукових метрологічних центрів – державні повірники, атестовані у порядку, встановленому нормативно-правовим актом ЦОВМ.

Види повірки вимірювальної техніки та вимоги до них

№ п/п	Види повірки вимірювальної техніки	Вимоги до вимірювальної техніки
1	Первинна	Їй підлягають ЗВТ під час випуску з виробництва і ремонту, під час введення ЗВТ в експлуатацію ЗВТ, що ввозять з – за кордону партіями
2	Періодична	Їй підлягають ЗВТ, які перебувають в експлуатації, у тому числі , які видають напрокат
3	Позачергова	Її проводять до закінчення міжповірочного інтервалу
4	Інспекційна	Її проводять під час здійснення державного метрологічного нагляду, щоб перевірити придатність ЗВТ до застосування
5	Експертна	Її проводять у разі виникнення співних питань щодо метрологічних характеристик придатності до застосування та правильності експлуатації ЗВТ

Повірку ЗВТ із застосуванням державних і вторинних еталонів проводять наукові метрологічні центри та територіальні органи, в яких зберігаються відповідні еталони. Її виконують учені – зберігачі цих еталонів.

Повірку ЗВТ під час експлуатації та випуску з виробництва і ремонту можуть виконувати повірочні лабораторії підприємств і організацій, уповноважені (акредитовані) на її проведення (далі – повірочні лабораторії).

Повірку проводять працівники цих лабораторій, атестовані як повірники у порядку, встановленому нормативно – правовим актом ЦОВМ.

Повірку ЗВТ із застосуванням первинних еталонів проводять повірочні лабораторії підприємств і організацій, у яких зберігають первинні еталони. Повірку проводять учені-зберігачі цих еталонів.

Повірку ЗВТ, які призначено для ввезення на територію України партіями, проводять під час їх випуску з виробництва повірочні лабораторії іноземних виробників, уповноважені (акредитовані) на її проведення.

Відповідно до міжнародних угод України, можна визнавати результати повірки, проведеної в іноземних державах. Порядок визнання результатів такої повірки встановлює ЦОВМ. Діяльність повірочних лабораторій підлягає державному метрологічному нагляду. Повірку ЗВТ здійснюють згідно з методиками повірки, викладеними в окремих документах і затвердженими

за встановленим ЦОВМ порядком, або викладеними у відповідних розділах експлуатаційних документів на ЗВТ.

ЗВТ визнають придатними до застосування, якщо результати повірки підтверджують їх відповідність метрологічним і технічним вимогам до цих ЗВТ, встановленим у нормативних чи експлуатаційних документах.

ЗВТ, які застосовують для спостереження за зміною ФВ без відображення їх значень з унормованою похибкою (як індикатори), повірці не підлягають. На такі ЗВТ та їх експлуатаційні документи має бути нанесена позначка «I».

Контроль за придатністю таких ЗВТ до застосування здійснюють за порядком, встановленим користувачем.

ЗВТ, які застосовують у складі вимірювальних каналів вимірювальних і вимірювально – інформаційних систем або автоматизованих систем керування технологічними процесами, можна окремо не повірять, якщо це передбачено затвердженими у встановленому порядку методиками повірки вимірювальних каналів цих систем.

Заявники оплачують роботи, пов'язані з проведенням на госп-розрахункових засадах усіх видів повірки відповідно до порядку, встановленого КМ України.

Підприємства, установи та організації, фізичні особи – суб'єкти підприємницької діяльності, які експлуатують, виробляють, ремонтують, продають і видають напрокат ЗВТ, що підлягають повірці, зобов'язані своєчасно подавати зазначені ЗВТ на повірку.

Переліки ЗВТ, що перебувають в експлуатації і підлягають повірці, складають їх користувачі (за винятком фізичних осіб, що не є суб'єктами підприємницької діяльності) і подають на погодження до наукових метрологічних центрів, територіальних органів та повірочних лабораторій, які будуть проводити повірку. Порядок складання та погодження цих переліків ЗВТ встановлено нормативно – правовим актом ЦОВМ.

ЗВТ, які призначено для застосування в побутовій сфері для власних потреб, подають на періодичну та позачергову повірку за бажанням їх власника. Це положення не стосується ЗВТ, результати вимірювань якими застосовують для розрахунків за спожиті для побутових потреб електричну і теплову енергію, газ і воду.

Повірку ЗВТ мають забезпечувати наукові метрологічні центри, територіальні органи та повірочні лабораторії безвідмовно (відповідно до

погоджених переліків ЗВТ, які перебувають в експлуатації і підлягають повірці, і (або) письмового звернення).

У разі відсутності умов, необхідних для проведення повірки, науковий метрологічний центр, територіальний орган або повірочна лабораторія зобов'язані зазначити іншу найближчу організацію, що може здійснити повірку.

ЗВТ подають на повірку укомплектованими, разом з необхідними допоміжними пристроями та, за вимогою наукового метрологічного центру, територіального органу або повірочної лабораторії, експлуатаційними документами, свідоцтвами про попередню повірку чи державну метрологічну атестацію.

Умови проведення повірки. Повірку ЗВТ можна проводити:

- у стаціонарних або пересувних повірочних лабораторіях;
- безпосередньо на підприємствах, у цьому випадку державних повірників (повірників) відряджають на підприємства;

Під час проведення повірки ЗВТ на місцях їх виготовлення, ремонту або експлуатації заявники повинні:

- забезпечувати у разі потреби доставку робочих еталонів та допоміжних засобів повірки, які належать науковим метрологічним центрам, територіальним органам або повірочним лабораторіям, до місця повірки і у зворотному напрямку;
- надавати необхідні нормативні, експлуатаційні та інші документи;
- відряджати допоміжний персонал та надавати приміщення, необхідні для проведення повірки;
- забезпечувати необхідні умови повірки (температуру і вологість навколишнього повітря, захист від зовнішніх електромагнітних полів тощо) та дотримання вимог техніки безпеки і санітарних норм (освітленість робочих місць для проведення повірки, наявність заземлення, вентиляції тощо);
- забезпечувати зберігання робочих еталонів і допоміжних засобів повірки, які належать науковим метрологічним центрам, територіальним органам або повірочним лабораторіям;
- надавати у разі застосування пересувної повірочної лабораторії місце стоянки та забезпечувати під'єднання її до мереж електро-, газо- і водопостачання, каналізації, а також забезпечувати збережність цієї лабораторії.

Якщо для проведення повірки на місцях виготовлення, ремонту або експлуатації ЗВТ необхідно застосовувати стаціонарні робочі еталони, то заявники повинні мати зазначені еталони та надавати їх у розпорядження державних повірників (повірників).

Первинна повірка. Під час випуску з виробництва допускається проводити вибіркову первинну повірку ЗВТ, якщо це передбачено відповідним нормативним документом або методикою повірки. Позитивні результати вибіркової первинної повірки поширюються на всі ЗВТ з партії, яку подають на повірку.

Первинну повірку проводять на місці виготовлення (ремонт) ЗВТ, у наукових метрологічних центрах, територіальних органах ЦОВМ або в повірочних лабораторіях. Місце проведення повірки визначають наукові метрологічні центри, територіальні органи або повірочні лабораторії, які проводять повірку.

Для проведення первинної повірки на місці виготовлення (ремонт) засобів вимірювальної техніки у заявників організують контрольно – повірочні пункти (КПП) територіальних органів або повірочних лабораторій.

КПП створюють згідно зі спільним наказом підприємства – заявника та територіального органу або повірочної лабораторії. Діяльність КПП регламентують положенням про КПП, затвердженим керівниками підприємства – заявника та територіального органу або повірочної лабораторії.

Якщо щоденний випуск ЗВТ з виробництва (ремонт) не забезпечує постійного завантаження одного державного повірника, то КПП можна не організувати. У цьому разі порядок проведення повірки визначають згідно з договором підприємства – заявника із територіальним органом або повірочною лабораторією.

Первинну повірку ЗВТ проводять за договором чи письмовим зверненням заявника, яке подають до організації, що проводить повірку, або керівнику КПП.

Періодична повірка. ЗВТ, які зберігають та не використовують, можна не піддавати періодичній повірці. У цьому випадку ЗВТ треба піддавати позачерговій повірці безпосередньо до введення в експлуатацію, продаж або видача напрокат.

ЗВТ, що перебувають в експлуатації, у тому числі й ті, яких видають напрокат, підлягають періодичній повірці через встановлені міжповірочні інтервали.

Періодичну повірку можна проводити на території заявника, наукового метрологічного центру, територіального органу або повірочної лабораторії. Місце проведення повірки визначає науковий метрологічний центр, територіальний орган або повірочна лабораторія, зважаючи на економічні чинники, можливість транспортування еталонів, допоміжного обладнання та ЗВТ, що повіряють, погоджуючи це рішення із заявником.

Періодичну повірку проводять у календарні терміни, встановлені переліком ЗВТ, які перебувають в експлуатації та підлягають повірці, або за письмовим зверненням заявників.

Порядок подання фізичними особами, які не є суб'єктами під-приємницької діяльності, – власниками ЗВТ, результати вимірювання якими застосовують для здійснення розрахунків за спожиті для побутових потреб електричну і теплову енергію, газ і воду, на періодичну повірку цих засобів, встановлює КМ України.

Тривалість перебування ЗВТ на повірці, за умови їх подання відповідно до переліку засобів вимірювальної техніки, які перебувають в експлуатації та підлягають повірці, або письмового звернення, не повинна перевищувати 15 робочих днів після оплати за повірку (за винятком ЗВТ, тривалість повірки яких, згідно з методикою повірки, перевищує цей термін).

Якщо ЗВТ призначено, щоб вимірювати (відтворювати) декілька ФВ, і (або) він має кілька діапазонів вимірювання, але його застосовують для вимірювання (відтворення) меншої кількості ФВ або не в усіх діапазонах (чи якщо ЗВТ застосовують лише в окремій частині діапазону вимірювання), то за письмовим зверненням заявника під час періодичної повірки таких ЗВТ дозволено контролювати їхні метрологічні характеристики лише щодо зазначених ФВ і діапазонів (частин діапазонів) вимірювання.

У таких випадках свідоцтво про повірку оформлюють обов'язково. У свідоцтві про повірку роблять відповідний запис щодо особливостей застосування таких ЗВТ.

Позачергова повірка. Позачергову повірку проводять у таких випадках:

- за потреби заявника пересвідчитися у придатності повірочного тавра до застосування;
- у разі пошкодження відбитка або втрати свідоцтва про повірку;
- у разі застосування ЗВТ як комплектувальних, якщо час, що минув після останньої повірки, перевищує половину міжпіврочного інтервалу;

- у випадку продажу (відправлення) споживачеві ЗВТ у тому випадку, коли час, що минув після останньої повірки, перевищує половину міжповірочного інтервалу;
- під час уведення в експлуатацію ЗВТ, які пройшли первинну повірку (за потреби).

Оформлення результатів первинної, періодичної та позачергової повірки. Результати вимірювання та інші дані, отримані під час проведення повірки, має бути задокументовано відповідно до методики повірки.

На вимогу заявника йому надають засвідчену копію протоколу повірки, якщо його складання передбачено методикою повірки.

Позитивні результати первинної, періодичної та позачергової повірки ЗВТ засвідчують відбитком повірочного тавра на ЗВТ і (або) свідоцтвом про повірку чи записом із відбитком повірочного тавра у відповідному розділі експлуатаційних документів. Порядок засвідчення зазначають у методиці повірки ЗВТ конкретного типу.

За погодженням із заявником дозволено оформлювати одне свідоцтво про повірку на декілька однотипних ЗВТ із обов'язковим зазначенням загальної кількості та заводських номерів усіх повірених ЗВТ.

Якщо доступ до вимірювального механізму (органів регулювання) ЗВТ пломбують, відбиток повірочного тавра ставлять на пломбу. Відповідну вимогу щодо необхідності нанесення відбитка повірочного тавра на пломбу наводять у методиці повірки і (або) в експлуатаційних документах.

Якщо одержані під час повірки дані наводять на зворотному боці свідоцтва про повірку, то відразу після закінчення наведеної інформації їх повинен підписати вчений-зберігач еталону або державний повірник (повірник) та затвердити печаткою або відбитком повірочного тавра.

Якщо одержані під час повірки дані наводять у додатку до свідоцтва про повірку, усі сторінки додатка повинні бути пронумеровані та мати позначення номера свідоцтва, до якого складено додаток. У свідоцтві про повірку має бути посилання на додаток із зазначенням кількості сторінок у ньому. Дані, отримані під час повірки та наведені у додатку, відразу після закінчення наведеної інформації повинен підписати вчений – зберігач еталону або державний повірник (повірник) та затвердити печаткою або відбитком повірочного тавра.

Форму і розміри повірочних тавр та тавр–гасників, порядок їх зберігання, обліку і застосування встановлено в ДСТУ 3968. ДСТУ 2708:2006.

Якщо відбиток повірочного тавра або пломбу пошкоджено чи свідоцтво про повірку втрачено, то ЗВТ вважають неповіреним.

Якщо в результаті повірки ЗВТ визнають непридатним до застосування, то вчений-зберігач еталону або державний повірник (повірник) анулює свідоцтво про повірку і (або) гасить попередній відбиток повірочного тавра чи робить відповідний запис в експлуатаційних документах.

Анулювання результатів повірки одного ЗВТ, які наведено у свідоцтві про повірку, оформлене на декілька однотипних ЗВТ, здійснюють, закреслюючи номер відповідного ЗВТ, про що треба засвідчити підписом ученого-зберігача еталону або державного повірника (повірника) та печаткою (або відбитком тавра – гасника).

На ЗВТ, що визнані непридатними до застосування за результатами повірки, оформлюють довідку про непридатність, яку видають заявнику на його вимогу.

Інспекційна повірка. Інспекційну повірку ЗВТ проводять у порядку, встановленому нормативно – правовим актом ЦОВМ.

За бажанням представників підприємств, організацій та фізичних осіб – суб'єктів підприємницької діяльності інспекційну повірку можна проводити за їх присутності.

Результати інспекційної повірки оформлюють довідкою, яку підписують державні повірники (повірники). Форму довідки про результати інспекційної повірки встановлюють у технічному завданні на проведення державного метрологічного нагляду.

Експертна повірка. Експертну повірку проводять за письмовою заявою державних органів (суду, прокуратури тощо) або юридичних та фізичних осіб. У заяві має бути зазначено мету експертної повірки і причину, що зумовила її проведення.

Під час проведення експертної повірки ЗВТ можуть бути присутні замовники, а також представники зацікавлених сторін.

За результатами експертної повірки складають висновок, який затверджує керівник наукового метрологічного центру, територіального органу або повірочної лабораторії, і його надають заявникові.

Один примірник висновку треба зберігати в тій організації (науковому метрологічному центрі, територіальному органі або повірчній лабораторії), яка проводила експертну повірку.

Примітка. Якщо експертну повірку проводять на замовлення слідчих та судових органів, то висновок оформлюють відповідно до вимог цих органів.

Запитання для самоконтролю до теми 4

1. Надати характеристику видам похибок та причинам їх виникнення.
2. Надати класифікацію похибок вимірювання.
3. Як оцінювати результати прямих вимірювань?
4. Як проводиться повірка засобів вимірювань?

Тема 5. Технічні засоби для вимірювання лінійних та кутових розмірів

- 5.1. Плоскопаралельні кінцеві міри довжини.
- 5.2. Штангенінструменти. Будова і правила користування.
- 5.3. Мікрометричні інструменти. Будова і правила користування.
- 5.4. Калібри.
- 5.5. Індикатори годинного типу.
- 5.6. Засоби вимірювання кутів та конусів.

5.1. Плоскопаралельні кінцеві міри довжини

Міра – це ЗВ, призначений для відтворення величини одного або декількох розмірів з необхідною точністю. Розрізняють однозначні, багатозначні міри і набір мір.

Однозначні міри відтворюють ФВ одного розміру.

Багатозначні міри відтворюють декілька однойменних величин різного розміру (масштабні лінійки).

Набори мір комплектують із кінцевих мір.

Основна вимога до наборів мір: будь-яке значення довжини в заданих межах має відтворюватися за допомогою не більш як чотирьох-п'яти мір, тому що зі збільшенням числа мір збільшується похибка блока. Так набір № 1 (рис. 5.1) із 87 кінцевих мір довжиною від 1,005 до 100 мм дає змогу відтворити довжину від 1,005 мм до 340 мм з використанням не більше чотирьох плиток. Застосовують також мікронний набір із 9 мір розмірами 1,001; 1,002; ...; 1,009 мм.



Рис. 5.1. Набір № 1 плоскопаралельних кінцевих мір довжини

Часто випускають мікронні кінцеві міри від 2 до 2,001 мм через 0,0001 мм для перевірки особливо точних вимірювальних приладів. На кожній

кінцевій мірі градуюють її номінальний розмір. Номінальний розмір мір до 5,5 мм наносять на одну із вимірювальних поверхонь, понад 5,5 мм – на бокову неробочу поверхню.



Рис. 5.2. Комплект наборів плоскопаралельних кінцевих мір довжини

Історична довідка. Поява кінцевих мір довжини відноситься до 1900 р, коли на Всесвітній виставці в Парижі фірма «Йогансон» (Швеція) демонструвала кінцеві міри довжини, з яких можна було скласти блоки на основі властивості притираємості. Тому іноді кінцеві міри довжини такого типу називаються плитками Йогансона. Виробництво кінцевих мір довжини в колишньому СРСР уперше було налагоджено на Тульському і Сестрорецькому заводах, починаючи з 30-х рр.

5.2. Штангенінструменти. Будова і правила користування

Дерев'яні штангенциркулі використовувалися вже на початку XVII століття. Перші справжні штангенциркулі з ноніусом з'явилися тільки в кінці XVIII століття в Лондоні. У Російській імперії штангенциркуль почали застосовувати набагато пізніше.

Штангенінструменти є поширеними в суднобудуванні видами вимірювального інструмента, точність яких не перевищує 0,05 мм.

Їх застосовують для вимірювання зовнішніх і внутрішніх діаметрів, довжин, товщини, глибин і т. д. До них належать штангенциркулі, штангенглибиномири, штангенрейсмуси.

Штангенциркулі випускаються трьох типів: ШЦ–І, ШЦ–ІІ і ШЦ–ІІІ (ГОСТ 166 –63). Кожен тип має спільні основні частини й власні особливості.

Штангенциркулі виготовляються з межами вимірювань 0–125 мм (ШЦ–І); 0–200 і 0–320 мм (ШЦ – ІІ); 0–500; 270–710; 320–1000; 500–1400; 800 – 2000 (ШЦ –ІІІ) і з величиною відліку 0,1 мм (ШЦ–І і ШЦ–ІІІ), 0,05–0,1 мм (ШЦ – ІІ).

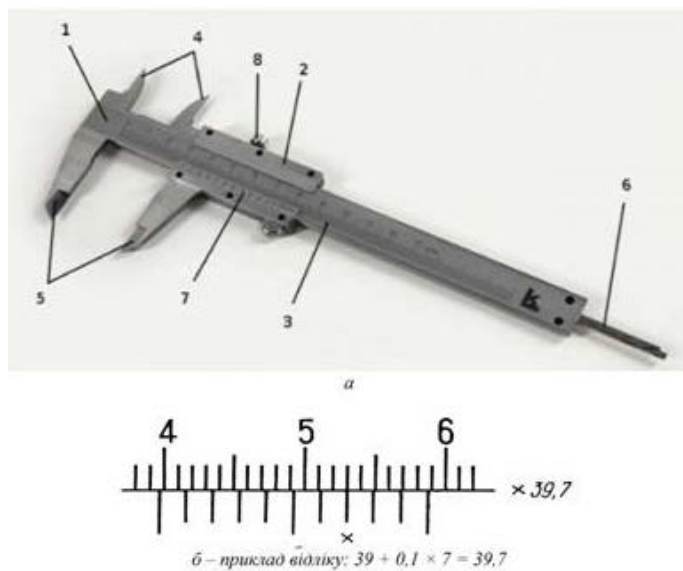


Рис. 5.3. Штангенциркуль ШЦ–І

Штангенциркуль ШЦ–І (рис. 5.3 а) є найбільш поширеним серед штангенінструментів і застосовується для вимірювання зовнішніх, внутрішніх розмірів та глибин з величиною відліку за ноніусом 0,1 мм.

Штангенциркуль має штангу (1), на якій нанесено шкалу (3) з міліметровими поділками. На одному кінці цієї штанги є нерухомі вимірювальні губки (4) і (5), а на іншому кінці – лінійка (6) для вимірювання глибин. По штанзі переміщається рухома рамка (2). Рамка у процесі зміни закріплюється на штанзі затиском (8). Нижні губки (5) служать для виміру зовнішніх розмірів, а верхні (4) – для внутрішніх розмірів. На скошеній грані рамки (2) нанесено шкалу (7), яка має назву «ноніуса».

Ноніус – рівномірна шкала з межею вимірювань, що дорівнюють ціні поділки основної шкали.

Ціна поділки ноніуса (відлік за ноніусом) дорівнює ціні поділки основної шкали розділеної на число поділок ноніуса: $p: c = a/p$. Ноніус призначений для визначення дробової величини ціни поділки штанги, тобто для визначення частки міліметра. Шкала ноніуса довжиною 19 мм розділена на 10 рівних частин; отже, кожний розподіл ноніуса дорівнює: $19: 10 = 1,9$

мм, тобто він коротший за відстань між кожними двома поділками, нанесеними на шкалу штанги, на 0,1 мм ($2,0 - 1,9 = 0,1$). При зімкнутих губках початкова поділка ноніуса співпадає з нульовим штрихом шкали штангенциркуля, а останній – 10 – й штрих ноніуса – з 19 – м штрихом шкали. Ціна поділки ноніусів штангенциркулів може дорівнювати 0,1 мм або 0,05 мм (штангенциркулі з величиною відліки ноніуса 0,02 мм у промисловості не виготовляються, але на виробництві ще зустрічаються і використовуються).

Перед вимірюванням на зімкнутих губках нульові штрихи ноніуса та штанги повинні збігатися. За відсутності просвіту між губками для зовнішніх вимірювань або при невеликому просвіті (до 0,012 мм) повинні збігатися нульові штрихи ноніуса і штанги.

Під час вимірювання деталей беруть у ліву руку, яка повинна знаходитися за губками і захоплювати деталь недалеко від губок. Права рука повинна підтримувати штангу, при цьому великим пальцем цієї руки переміщують рамку до зіткнення з поверхнею, яка перевіряється, не допускаючи перекосу губок і докладаючи нормального вимірювального зусилля.

Рамку закріплюють затиском великим і вказівним пальцями правої руки, підтримуючи штангу іншими пальцями цієї руки; ліва рука при цьому повинна підтримувати нижню губку штанги. При читанні показань штангенциркуля тримають прямо перед очима. Ціле число міліметрів відраховується за шкалою штанги зліва направо нульовим штрихом ноніуса. Дробова величина (кількість десятих часток міліметра) визначається множенням величини відліку (0,1 мм) на порядковий номер штриха ноніуса, не рахуючи нульового, що збігається зі штрихом штанги. Приклади відліку показані на рис. 5.3, б.

Штангенциркуль ШЦ–II (рис. 5.4) відрізняється від попередньої конструкції тим, що у нього відсутня лінійка глибиноміра, губки (4) мають гострі закінчення для виконання площинної розмітки, а інші губки (5) мають плоскі поверхні та застосовуються при зовнішніх і внутрішніх вимірюваннях.

Штангенциркуль ШЦ–II оснащений ще рамкою мікрометричної подачі (9) для плавного підведення губок до поверхні вимірюваної деталі.

Штангенциркуль складається зі штанги (1) з основною шкалою (3), вимірювальних губок (3) для зовнішніх та внутрішніх вимірів, рухомої рамки

(2), затискувача рамки (8), ноніуса (7), рамки мікро-метричної подачі (9) та фіксуєного гвинта (10).

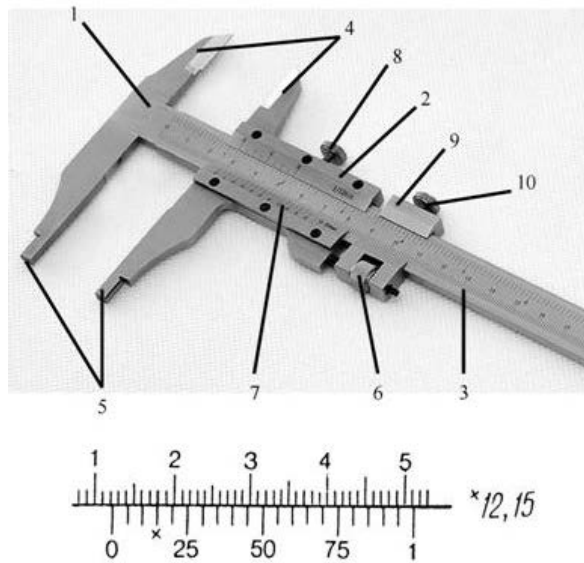


Рис. 5.4. Штангенциркуль ШЦ-II

При вимірюваннях внутрішніх розмірів губками (5) до відліку за шкалами штанги і ноніуса потрібно приплюсовувати товщину губок, яка маркується на них.

Штангенциркуль ШЦ – III (рис. 5.5) з величиною відліку за ноніусом 0,05 мм призначений для зовнішніх і внутрішніх вимірювань. Цей штангенциркуль застосовується рідко.



Рис. 5.5. Штангенциркуль ШЦ-III

Історична довідка. У сучасній німецькій мові слово «штангенциркуль» відсутнє. По – німецьки штангенциркуль називається Messschieber або Schieblehre – відповідно «розсувний вимірювач» або «розсувна лінійка».

Різновид штангенциркуля, який оснащено глибиноміром, на професійному слензі називається «Колумбус» або «Колумбик». Ця назва походить від «Columbus» – назви виробника вимірювального інструмента.

Деякі види сучасних штангенциркулів показані на рис. 5.6:

- цифровий (електронний);
- зі стрілочним індикатором.



Рис. 5.6. Штангенциркуль: цифровий (а), зі стрілочним індикатором (б)

При читанні показань штангенциркуль тримають прямо перед очима. Ціле число міліметрів відраховується за шкалою штанги зліва направо нульовим штрихом ноніуса. Дробова величина (кількість десятих часток міліметра) визначається множенням величини відліку (0,1 або 0,05 мм) на порядковий номер штриха ноніуса, не рахуючи нульового, що збігається зі штрихом штанги.

Штангенглибиномір (рис. 5.7, а) застосовується для прямого вимірювання глибини виїмок і висоти уступів. Підставою штанген-глибиноміра є рамка з основою (1). Крізь рамку проходить штанга зі шкалою (2) і вимірювальною поверхнею на торці. Ноніус (4) завдано на окремій пластині і закріплено в рамці (1). Мікрометричний механізм (3) на штангенглибиномірі такий самий, як і на штанген-циркулі ШЦ – II.

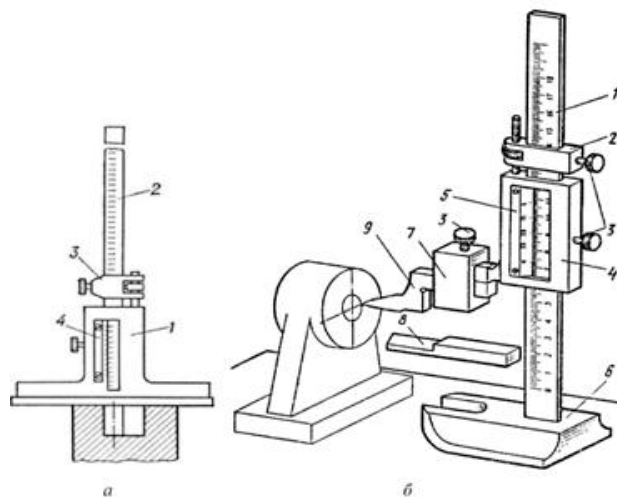


Рис. 5.7. Штангенглибиномір (а), штангенрейсмус (б)

Штангенрейсмуси (рис. 5.7, б) застосовуються для просторової розмітки і прямих вимірювань на точній плиті відстаней від базових поверхонь деталей до виїмок, виступів і осей отворів.

Опорною деталлю штангенрейсмуса є основа (б), в якій закріплено штангу (1) з міліметровою шкалою. По штанзі пересувається рамка (4) з

ноніусом (5) та з державкою для кріплення вимірювальних стрижнів (8) або (9). Рамка мікрометричної подачі (2) тут застосована така ж сама, як і на штангенциркулі ТТЦЦ–ІТ, (10) – затиск рамки мікрометричної подачі.

Показання штангенрейсмуса читаються так само, як і штанген-циркуля. При вимірюванні висоти верхньою вимірювальною площиною необхідно до отриманого розміру додати висоту ніжок.

5.3. Мікрометричні інструменти. Будова і правила користування

Мікрометр – універсальний інструмент (прилад), призначений для вимірювань лінійних розмірів абсолютним контактним методом в області малих розмірів з високою точністю (до 1 мкм), перетворюючим механізмом якого є мікропара «гвинт-гайка».

Використання гвинтової пари у відліковому пристрої було відомо ще в XVI столітті, наприклад, у гарматних прицільних механізмах (1570 р.), пізніше гвинт стали використовувати в різних геодезичних інструментах. Перший патент на мікрометр як самостійний вимірювальний засіб був виданий Пальмеру (Jean-Louis Palmer) в 1848 році (Франція).

Мікрометричні вимірювальні інструменти засновані на використанні точної гвинтової пари (гвинт – гайка), яка перетворює обертальні рухи мікрогвинта в поступальні. До мікрометричних інструментів відносяться: мікрометри, мікрометричні глибиноміри, мікрометричні нутроміри.

Мікрометричні інструменти призначені для абсолютного контакт-ного методу вимірювання. Ціна поділки приладу – 0,01 мм. Похибка вимірювання залежить від меж вимірювання мікрометра і становить: від 3 мкм для мікрометрів 0 –25 мм до 50 мкм для мікрометрів з межами виміру 400 – 500 мм. Принцип мікрометричної пари вико-ристовується в конструкціях багатьох вимірювальних приладів.

Загальний вигляд гладкого мікрометра показаний на рис. 5.8.

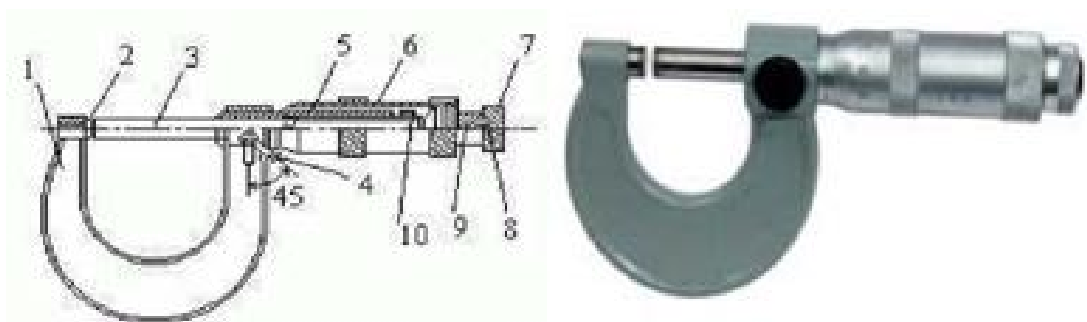


Рис. 5.8. Мікрометр гладкий

Корпусом інструмента служить скоба (1), в яку запресовані з одного боку п'ята (2), з іншого – стебло (5), на якому закріплено мікрогайку і нанесено поздовжню шкалу. Однією вимірювальною поверхнею є торець мікрометричного гвинта (3), що висувається зі стебла, іншою – торець п'яти (2). Мікрогвинт пов'язаний з корпусом барабана (6), який має на конусному кінці кругову шкалу. Закінчується барабан різьбою, на яку нагвинчується гайка (9), що є корпусом механізму тріскачки. Основне призначення тріскачки – забезпечувати сталість вимірювального зусилля за рахунок храповика (7) і під – пружиненого стрижня (8). Мікрометр забезпечений пристроєм (4), що дозволяє стопорити мікрогвинт гайкою (10).

Відлік показань мікрометричних інструментів. Відліковий пристрій мікрометричних інструментів складається з двох шкал. Поздовжня шкала має два ряди штрихів з інтервалом 1 мм, розташованих по обидві сторони горизонтальної лінії і зміщених відносно один одного на 0,5 мм. Таким чином, обидва ряди штрихів утворюють одну поздовжню шкалу з ціною поділки 0,5 мм.

Мікрогвинт пов'язаний з барабаном (6), який на конусному кінці має кругову шкалу з числом розподілів $n = 50$. Враховуючи, що крок різьби гвинтової пари $8 = 0,5$ мм, ціна поділки кругової шкали (ноніуса) мікрометра «С» дорівнює: $C = 8/n = 0,5/50 = 0,01$ мм.

Розмір вимірюваної деталі з точністю до 0,5 мм розраховують за шкалою стебла покажчиком, яким є скошений край барабана. Соті частини міліметра розраховують по круговій шкалі барабана, покажчиком якої є поздовжній штрих на стеблі мікрометра.

Установка мікрометра на нуль. Перед початком вимірювань мікрометричними інструментами проводять їх перевірку і установку на нуль. Установку мікрометрів на нуль здійснюють на початковому розподілі шкали. Для мікрометрів з межею вимірювань 0–25 мм – на нульовій поділці шкали, для мікрометрів з межами вимірювань 25–50 мм – на розподілі 25 і т. д. Обережне обертання мікрогвинта за тріскачку призводить до зіткнення вимірювальних поверхонь мікрогвинта й п'яти. У мікрогвинта з межею вимірювання 25–50, 50–75 і т. д. мікрогвинт і п'ята з'єднуються між собою через блок кінцевих мір довжини розміром 25, 50 мм і т. д. або через спеціальні циліндричні пристрої, що додаються в комплект до мікрометра.

При зазначеному зіткненні скошений край барабана мікрометра має встановитися так, щоб штрих початкової поділки основної шкали (нуль або

25, 50 мм і т. д.) було повністю видно, а нульова поділка кругової шкали барабана збігалася з поздовжньою горизонтальною лінією на стеблі (5). Якщо такого збігу немає, то стопором (4) необхідно зафіксувати мікрогвинт (3) і, притримуючи барабан (6) за накатаний виступ, послабити накидну гайку (9). Потім, повертаючи звільнений корпус барабана, суміщають нульову поділку на барабані з гори-зонтальною лінією на стеблі (5) мікрометра, і, притримуючи корпус барабана за накатаний виступ, знову закріплюють барабан гайкою (9).

Слід мати на увазі, що при затягуванні гайки (9) нульова установка може порушитися, тому потрібно знову перевірити її і за необхідності виправити.

Установка мікрометричного нутроміра на нуль проводиться за спеціальною настановною скобою, яка входить до комплекту приладу. Можлива установка і за допомогою кінцевих мір довжини.

Притримуючи нутромір за гільзу і обертаючи барабан за накатні кільця, вивертають мікрометричний гвинт до зіткнення вимірювальних наконечників із поверхнями настановної скоби. Потім стопорять мікрогвинт.

Нульовий штрих горизонтальної лінії основної шкали повинно бути видно повністю, скошений край барабана має стосуватися даного штриха, а нульова поділка барабана – збігатися з гори-зонтальною лінією основної шкали.

Найбільшими погойдуваннями визначають, чи відповідає розмір мікрометра найменшій відстані між поверхнями настановної скоби або кінцевих мір довжини. Якщо мікрометр між поверхнями скоби проходить туго, то мікрогвинт треба відстопорити і повторити налаштування. Їх повторюють кілька разів для пошуку найменшої відстані між поверхнями настановної скоби (знаходять найменше показання нутроміра). Якщо мікрометр не встановлений на нуль, то при застопороному мікрогвинті необхідно послабити контргайку і відрегулювати установку барабана на нуль. Після остаточного встановлення на нуль можна приєднати подов-жувальні трубки, при цьому нульова установка не порушується.

При вимірюванні мікрометром відводять вимірювальну поверхню мікрогвинта (3), обертаючи барабан (6), на необхідну відстань. Між мікрогвинтом (3) та п'ятою (2) поміщають вимірювану деталь і за допомогою барабана (6) скорочують зазор між вимірюваною деталлю і вимірювальними поверхнями до 1–2 мм. Остаточне зіткнення вимірювальних

поверхонь з деталлю здійснюють обертанням тріскачки (7) і знімають показання приладу.

Залежно від конструкції (форми корпусу або скоб, у які вбудовується мікропара, форми вимірювальних поверхонь) чи призначення (вимірювання товщини листів, труб, зубів зубчастих коліс), мікрометри поділяють на гладкі, важільні, листові, трубні, дровові, призматичні, канавкові, різьбомірні, зубомірні й універсальні.

Виготовляються мікрометри ручні і настільні, в тому числі зі стрілочним відліковим пристроєм. Мікрометричні пари викорис-товуються також у глибиноміра, нутроміра та інших вимірювальних засобах. Найбільше поширення мають гладкі мікрометри. Настільні мікрометри (у тому числі зі стрілочним відліковим пристроєм) призначаються для вимірювання маленьких деталей (до 20 мм), їх часто називають часовими мікрометрами.

Деякі види мікрометрів показано на рис. 5.9 – 5.14.

Під час вимірювання мікрометричним нутроміром його вводять у вимірюваний отвір і, відстопоривши мікрогвинт, обертанням накатного кільця приводять вимірювальні наконечники приладу в зіткнення зі стінками отвору, а потім знову стопорять мікрогвинт.



Рис 5.9. Мікрометр з круговою шкалою для зовнішніх вимірювань і діапазоном вимірювання 175 – 200 мм, із ціною поділки 0,01 мм



Рис. 5.10. Трубний мікрометр



Рис. 5.11. Мікрометр електронний



Рис. 5.12. Мікрометр важільного типу



Рис. 5.13. Мікрометр цифровий

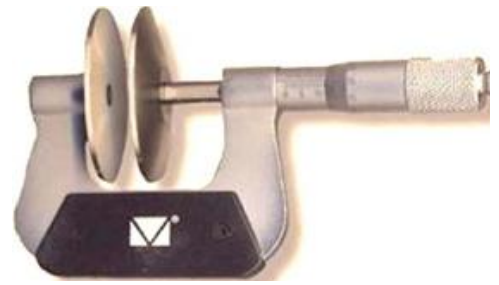


Рис. 5.14. Мікрометр листовий

Вимірювання розміру здійснюють кілька разів, злегка похитуючи мікрометри в площині, що проходить через вісь отвору, відшукуючи відповідно найбільший і найменший розміри. Після остаточного встановлення нутромір на розмір стопорять мікрогвинт і знімають показання.

5.4. Калібри. Характеристика засобу вимірювань та особливості застосування.

Калібр (фр. calibre, calibre a limites) – безшкальний вимірювальний інструмент, призначений для контролю розмірів, форми і взаємного розташування поверхонь деталі. Залежно від умов оцінки придатності деталей, калібри бувають нормальні і граничні.

Нормальні калібри копіюють дійсні розміри виробу і його форму. Придатність виробу в цьому випадку оцінюють за тим, як калібр увійшов у виріб і як прилягає до нього. Проте оскільки ступінь прилягання виконавець визначає за своїм відчуттям, результати перевірки будуть суб'єктивними. Тому нормальні калібри застосовують рідко. Нормальний калібр (шаблон) використовується для перевірки складних профілів.

Граничний калібр має прохідну і непрохідну сторони (верхнє і нижнє відхилення номінального розміру), що дозволяє контролювати розмір у полі допуску. Граничні калібри застосовуються для виміру циліндричних, конусних, різьбових і шліцьових поверхонь. При конструюванні граничних калібрів повинен застосовуватися принцип Тейлора, згідно з яким прохідний калібр є прототипом сполученої деталі і контролює розмір по всій довжині з'єднання з урахуванням похибок форми.

Непрохідний калібр повинен контролювати тільки власне розмір деталі і тому має малу довжину для усунення впливу похибок форми. Калібри виготовляють із хромистої сталі. Калібри для валів називаються скобами (кільцями) (рис. 5.15), а для отворів – пробками (рис. 5.16).

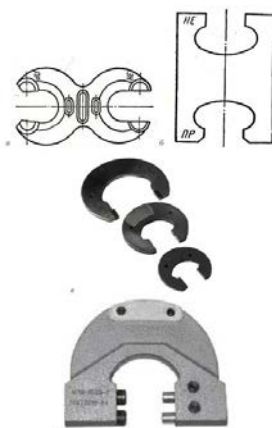


Рис. 5.15. – Калібри для контролю валів: скоби: *а* – штампована двостороння; *б* – листова двостороння; *в* – односторонні; *г* – зі вставками

Комплект складається з прохідного і непрохідного калібрів. З допомогою прохідного калібра контролюють початок поля допуску, непрохідного – кінець поля допуску деталі. Деталь вважається придатною, якщо під дією власної маси прохідний калібр проходить, а непрохідний – ні.

На робочих місцях застосовуються робочі калібри (Р–ПР і Р–НЕ). Контролери і замовники використовують приймальні калібри (П–ПР і П–НЕ). Калібри у процесі їх виготовлення та експлуатації перевіряють контрольними калібрами (К–ПР і К–НЕ).

Прохідною пробкою контролюють найменший розмір отвору, непрохідною – найбільший. Брак за прохідним калібром можна виправити, брак за непрохідним калібром непоправний.

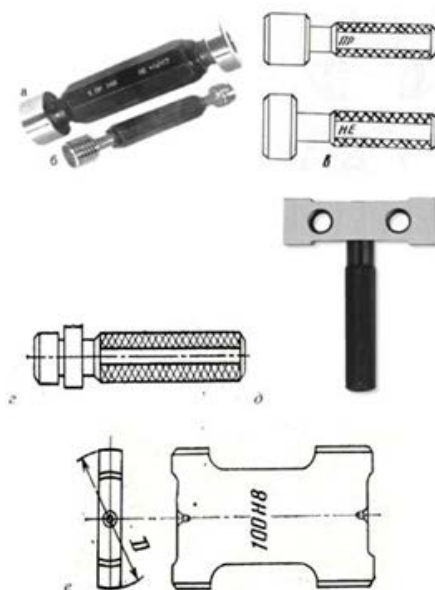


Рис. 5.16. Калібри для контролю отворів: пробки: *а* – двостороння; *б* – різьбова двостороння; *в* – одностороння прохідна і непрохідна неповна; *г* – гранична; *д* – із неповним профілем; *е* – листова двостороння

Калібри – пробки за конструктивним виконанням бувають повними і неповними, двосторонніми і односторонніми, регульованими і нерегульованими. Повними пробками, як правило, перевіряють вироби діаметром до 100 мм, неповними – понад 100 мм.

Непрохідною скобою контролюють найменший розмір вала, прохідною – найбільший. Регульовані скоби, як правило, застосовують в умовах серійного виробництва, що дає змогу розширити діапазон контрольованих виробів, хоча при цьому точність контролю нижча, ніж у нерегульованих скоб.

Розрізняють власний і робочий розміри скоб. Власний розмір одержують за результатами вимірювань; робочий – це розмір скоби при навантаженні. При контролі діаметрів валів від 50 до 100 мм різниця між власним і робочим розмірами скоб становить 1,5 мкм, при контролі діаметрів 100...170 мм – 4,5 мкм.

У процесі контролю калібри спрацьовуються, особливо прохідні калібри. При виготовленні калібрів потрібно стежити, щоб їх розміри знаходились у межах встановлених стандартами допусків.

5.5. Індикатори годинного типу

Вимірювальними головками називаються відлікові пристрої, що перетворюють малі переміщення вимірювального стрижня у великі переміщення стрілки за шкалою (індикатори годинникового типу, важільно – зубчасті індикатори, багатооборотні індикатори, важільно – зубчасті голівки).

У якості окремого вимірювального пристрою головки викорис-товуватися не можуть, і для вимірювання їх встановлюють на стійках, штативах або оснащують ними прилади та контрольні – вимірювальні пристрої.

Вимірювальні головки призначені в основному для відносних вимірювань. Якщо розміри деталей менші за діапазон показань приладу, то вимірювання можуть бути виконані абсолютним методом.

Найбільш поширеними вимірювальними головками з зубчастою передачею є індикатори годинникового типу.

Індикатор годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм із пере-суванням вимірювального стрижня паралельно до шкали призначений для відносних вимірювань зовнішніх розмірів, відхилень форми і розташування поверхонь (рис. 5.17).

Індикатор годинникового типу є також показуючим пристроєм індикаторної скоби, індикаторного глибиноміра й індикаторного нутроміра. На лицьовому боці циферблата індикатора є дві стрілки і дві шкали; велика стрілка (1) над оцифрованою круглою шкалою (2) і мала стрілка (4) над відліковою шкалою (5). Кругова шкала має ціну поділки 0,01 мм, а мала шкала – 1 мм. Пересування вимірювального стрижня (6) на 1 мм викликає поворот стрілки (1) на 100 поділок (один повний оберт), а стрілки (4) – на одну поділку. Шкала (2) індикатора разом із обідком при установці шкали на нульову поділку повертається відносно великої стрілки (1) і фіксується стопором (3).

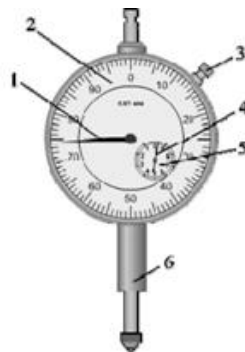


Рис. 5.17. Індикатор годинникового типу: 1 – велика стрілка; 2 – шкала індикатора; 3 – стопор; 4 – стрілка; 5 – відлікова шкала; 6 – вимірювальний стрижень.

Конструкція індикатора годинникового типу являє собою вимірювальну голівку з поздовжнім пересуванням наконечника (рис. 5. 18).

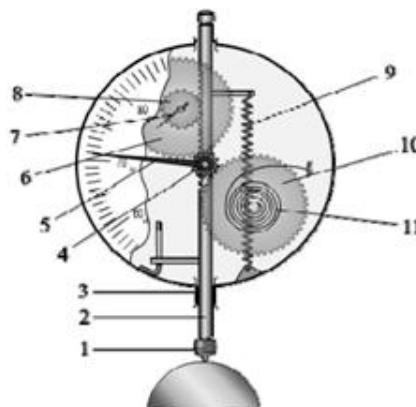


Рис. 5.18. – Пристрій індикатора годинникового типу: 1 – наконечник; 2 – вимірювальний стрижень – рейка; 3 – гільза; 4 – трибка; 5 – стрілка; 6 – передавальне зубчасте колесо; 7 – стрілка; 8 – зубчасте рейкове колесо; 9 – пружина; 10 – зубчасте колесо; 11 – пружинний волосок.

Основою індикатора є корпус, усередині якого змонтовано перетворювальний механізм – рейково-зубчасту передачу. Крізь корпус

проходить вимірювальний стрижень (2) із наконечником (1). На стрижні нарізано рейку. Рухи вимірювального стрижня – рейки (2) передаються зубчастими колесами – рейковим (8), передавальним (6) і трибкою (4) основній стрілці 5, величина повороту якої розраховується за круглою шкалою – циферблатом. Для установки на «0» кругла шкала повертається обідком. Кругла шкала індикатора годинникового типу складається зі 100 поділок, ціна кожної поділки – 0,01 мм. Це означає, що при пересуванні вимірювального наконечника на 0,01 мм стрілка індикатора перейде на одну поділку шкали.

В індикаторі годинникового типу передбачена гвинтова пружина (9), один кінець якої закріплений на вимірювальному стрижні, а інший – на корпусі індикатора. Ця пружина створює вимірювальне зусилля на стрижні $P = 150 \pm 60$ сН.

Усі індикатори годинникового типу мають ціну поділки великий шкали рівну 0,01 мм. Більшість індикаторів має діапазон показань 2 мм (ІЧ–2), 5 мм (ІЧ–5), 10 мм (ІЧ–10), рідше випускаються індикатори з діапазоном показань 25 мм (ІЧ–25) і 50 мм (ІЧ–50).

Похибка вимірювання індикатором годинникового типу залежить від переміщення вимірювального стрижня. Так у діапазоні показань 1–2 мм похибка вимірювання знаходиться в межах 10–15 мкм, а в діапазоні 5–10 мм похибка знаходиться в межах 18–22 мкм.

Індикаторні нутроміри. Індикаторні нутроміри призначені для вимірювання внутрішніх розмірів і діаметрів отворів відносним методом.

Найбільш часто застосовують нутроміри типорозмірів з наступного ряду діапазонів виміру: 6–10; 10–18; 18–50; 50–100; 100–160; 160–250; 250–450; 450–700; 700–1000 мм.

Пристрій і роботу індикаторних нутромірів розглянемо на прикладі нутроміра моделі НІ–100 (рис. 5.19).

У корпусі нутроміра вставлено втулку – вставку (2), у яку з одного боку ввернуто змінний нерухомий вимірювальний стержень (3), а з іншого – знаходиться рухливий вимірювальний стержень (4), що впливає на двоплечний важіль (5), закріплений на осі (6).

Усередині корпусу розміщений шток (8), який притискається до важеля (5) вимірювальним стержнем індикатора годинникового типу і спіральною пружиною (10). Останні створюють вимірювальне зусилля в межах від 200 до 500 сН.

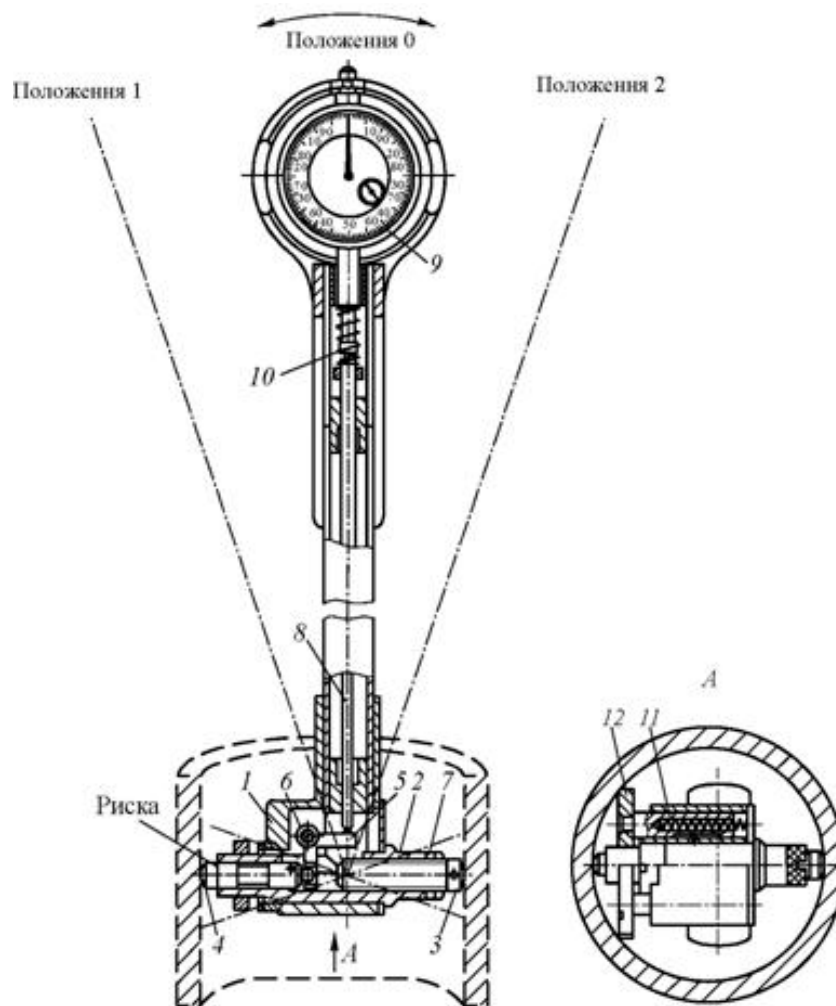


Рис. 5.19. – Індикаторний нутромір

У межах діапазону вимірювань нутроміри забезпечуються ком-плектом змінних вимірювальних стержнів. Положення нерухомого вимірювального стержня після налаштування фіксується гайкою (7). Рухомий вимірювальний стержень (4) під впливом вимірювального зусилля знаходиться в крайньому вихідному положенні. Центруючий місток (12) підтискається двома пружинами (11) до поверхні контро-льованого отвору та забезпечує з'єднання лінії вимірювання з діаметром отвору.

Вимірювання індикаторним нутроміром включає такі дії:

1. Підрахувати за номінальним розміром отвору вимірюваної деталі номінальні розміри ПМДК.
2. Підготувати інсталяційний комплект (рис. 5.20) з блоку ПМКД, двох боковиків (2) і струбцини (1).
3. Із комплекту змінних регульованих стержнів (додаються до нутроміра) вибрати стержень із діапазоном розмірів, у якому зна-ходиться номінальний розмір вимірюваного отвору.

4. Загвинтити змінний регульований стержень (3) у корпус нутроміра (5).

5. Ввести нутромір вимірювальними стержнями в інсталяційний комплект між боковиками і створити для індикатора годинникового типу натяг 1-2 мм (рис. 5 20).

6. Похитуючи нутромір від себе на себе, повертаючи його вліво і вправо навколо вертикальної осі, потрібно встановити вісь вимірювальних стержнів (вісь виміру) в положення, що збігається з найменшою відстанню між обмірними поверхнями боковика. Це положення покаже велика стрілка індикатора, коли дійде до найбільш далекої (при її русі за годинниковою стрілкою) поділки шкали і почне рух назад. Надавши правильного положення індикатору, потрібно затиснути контргайку (4) змінного вимірювального стержня (3) та встановити нульову поділку шкали індикатора до збігу з великою стрілкою.

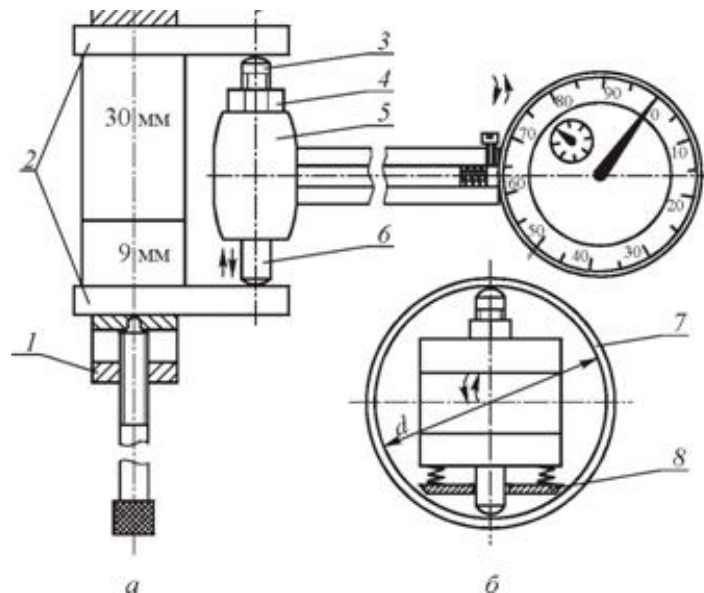


Рис. 5.20. Індикаторний нутромір під час настройки (а) і при вимірюванні (б).

Після налаштування нутроміра на «0» можна приступити до вимірювання відхилень розміру отвору деталі від номіналу.

Вводимо в отвір вимірюваної деталі вимірювальну головку нутро-міра. Підпружинений центруючий місток (8) орієнтує вимірювальну вісь нутроміра строго в діаметральній площині вимірюваного отвору (рис. 5.20, б).

Похитуючи нутромір у вертикальній площині, визначаємо показання індикатора при крайньому правому положенні великої стрілки.

При визначенні дійсних відхилень розмірів отворів від номіналу керуються таким правилом: відхилення беруть зі знаком «мінус» (–), якщо велика стрілка індикатора відхилилася від «0» розподілу шкали за

годинниковою стрілкою, а відхилення проти годинникової стрілки показує збільшення діаметра отвору номінального розміру і дійсне відхилення беруть зі знаком «плюс» (+).

Значення дійсного відхилення підраховують множенням числа поділок шкали індикатора (вказане великою стрілкою від «0») на ціну поділки 0,01 мм. Дійсний розмір діаметра отвору дорівнюватиме номінальному діаметру отвору «плюс» (+) або «мінус» (–) дійсне відхилення.

5.6. Засоби вимірювання кутів та конусів

У машинобудуванні розрізняють 4 групи вимірювання кутів.

До першої групи відносять прилади, застосування яких засноване на порівнянні вимірюваного кута з жорсткою мірою: призматичні кутові прилади (рис. 5.21), конусні калібри, шаблони та ін. Відмітною особливістю кутомірних приладів цієї групи є сталість одного (наприклад, у кутнику) або декількох (наприклад, у призматичній мірі) кутів.

При використанні цих приладів їх або безпосередньо вводять у зіткнення з твірними вимірюваного кута (потім визначають ступінь прилягання «на просвіт» або «за фарбою»), або за ними налаштовують на нуль відліковий пристрій будь – якого контрольного приладу.

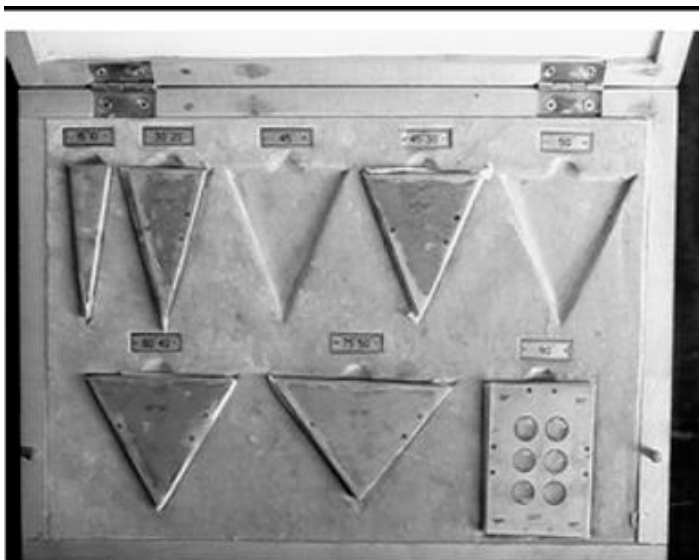


Рис. 5.21. Набір приладів для вимірювання кутів

До другої групи відносять прилади для вимірювання кутів методом порівняння їх з кутом, на який налаштовується вимірювальний прилад, наприклад тангенсні і синусні лінійки (рис. 5.22).

Налаштування здійснюють з функцій тангенса або синуса на розмір вимірюваного або додаткового кута. За допомогою відлікової пристрою

вимірюваний кут порівнюють з кутом, на який налаштований прилад, і визначають відхилення.

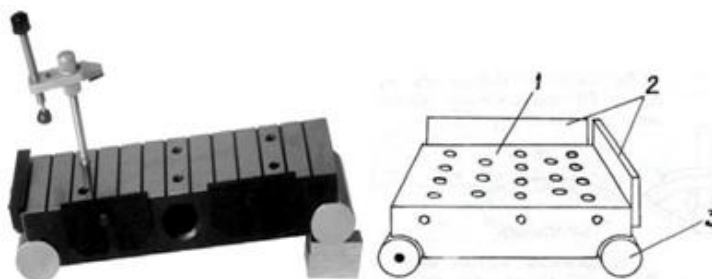


Рис. 5.22. Синусна лінійка: 1 – столик; 2 – опорні планки; 3 – ролик

Синусна лінійка (С. л.) – спеціальна лінійка у вигляді прямо-кутного паралелепіпеда з двома циліндричними роликами (кульками) на кінцях (рис. 5.23). С. л. призначається для встановлення заданого кута при виготовленні або вимірюванні деталей (наприклад, конусів, клинів і т.п.). С.л. розташовується на плиті, під один ролик плити встановлюється блок кінцевих мір довжини, розмір h яких підрахо-вують за формулою $h = L \cdot \sin \alpha$, де α – кут, на який потрібно встановити площину С. л., L – відстань між осями роликів. Відстані між роликами зазвичай складають від 100 до 500 мм, встановлення кута (нахилу) здійснюється в одному, або двох взаємоперпендикулярних напрямках. Вимірювана або оброблювана деталь встановлюється на плоскій поверхні С. л. (або у центрах). Найбільш часто С. л. використовують разом із відліковою головкою для визначення похибки кута у конусних калібрів (рис. 5.23).

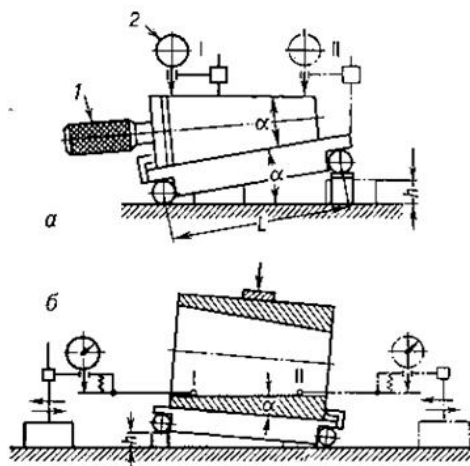


Рис. 5.23. Вимірювання кута при використанні синусної лінійки: а – зовнішнього конуса; б – внутрішнього конуса; 1 – конусний калібр; 2 – відлікова головка; I і II – положення відлікової головки

С. л. налаштовують на номінальний кут конуса, а за шкалою відлікової головки визначають відхилення від горизонтального положення твірної

конуса щодо плити, на якій знаходиться С. л. За допомогою С. л. зазвичай встановлюють кути від 0 до 45° із похибкою від 4 до $15''$, що залежить від номінальної відстані між роликами, розміру кута, на який проводиться установка С. л., і від точності її виготовлення.

Принцип С. л. використовується, наприклад, у конструкціях різних приладів для передачі рухів під кутом до основного руху, у пристроях до металорізальних верстатів при обробці деталей із похилими поверхнями.

Синус – одна з тригонометричних функцій; позначення – «sin». Синусом гострого кута в прямокутному трикутнику називається відношення катета, лежачого проти цього кута, до гіпотенузи. Індійські математики синус позначали словом «джіва» (в перекл. – «тягива лука»). Араби переробили цей термін у «джіба», який надалі пере-творився на «джайо» – повсякденне слово арабської мови, що означає «вигин», «пазуха», «складка одягу» і відповідає латинському слову *sinus*.

У третю групу входять прилади, в яких застосовується спосіб порівняння вимірюваного кута з кутовою шкалою: кутоміри з ноніусом (рис. 5.24), оптичні кутоміри (рис. 5.25), ділильні головки, ділильні столи, рівні, теодоліти, квадранти, гоніометри і т. д. Цей спосіб часто називають гоніометричним.

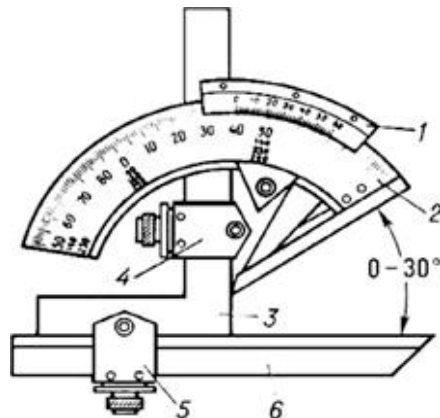


Рис. 5.24. Кутонір з ноніусом: 1 – ноніус; 2 – шкала, 3 – косинець; 4 і 5 – тримачі; 6 – знімна лінійка



Рис. 5.25. Оптичний кутомір

Кутоміри з ноніусом випускаються двох типів: УН – для вимірювання зовнішніх і внутрішніх кутів; УМ – для вимірювання зовнішніх кутів.

Кутоміром УМ (рис. 5.26, а) вимірюють зовнішні кути від 0 до 180°.

Основою цього кутоміра служить транспортер 5 зі шкалою, що має ціну поділки 1°; у центрі транспортера розташована вісь 2, на ребрі транспортера укріплена нерухома вимірювальна лінійка 4. На осі 2 повертається сектор 3 разом із рухомою лінійкою 10, ноніусом 8 (ціна поділки ноніуса становить 2' або 5'), а також стопором 9.

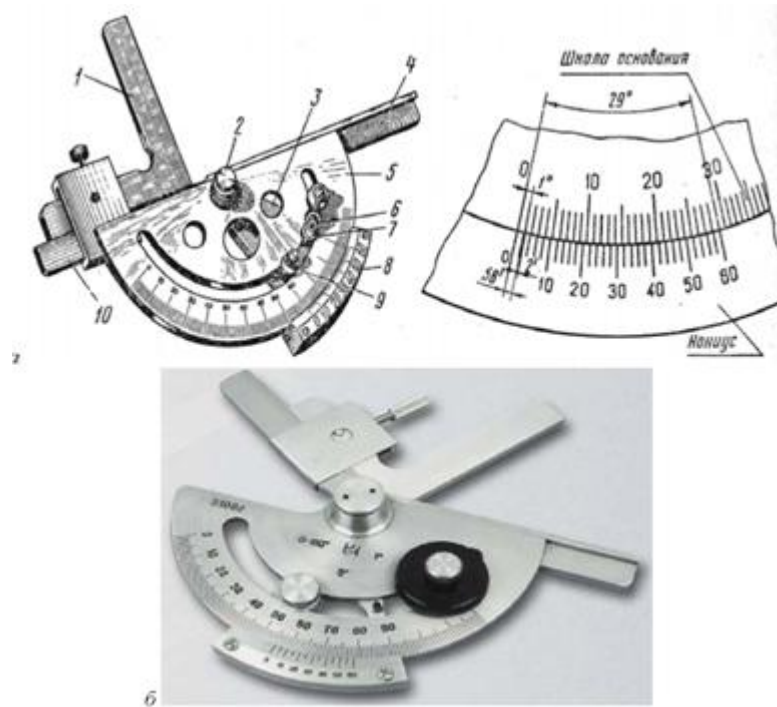


Рис. 5.26. Кутомір транспортерний УМ з ціною поділки ноніуса:
а – 2'; б – 5'

Кути вимірюють трьома основними методами:

- 1) методом порівняння з жорсткими контрольними інструментами – кутовими приладами, косинцями, конусними калібрами і шаблонами;
- 2) абсолютним гоніометричним методом, який оснований на використанні приладів із кутомірною шкалою; до універсальних засобів вимірювання кутів належать ноніусні, оптичні й індикаторні кутоміри;
- 3) непрямим тригонометричним методом, який полягає у визначенні лінійних розмірів, пов'язаних із вимірюванням кута тригонометричною функцією.

Якщо потрібно виміряти зовнішній кут у межах від 0 до 90°, то збирається весь комплект кутоміра, для чого на рухому лінійку 10 надягають тримач зі знімним косинцем 1 і гвинтом затиску. Для плавності підведення

до потрібного стану кутомір забезпечений мікроподачею 6, 7. Якщо потрібно виміряти зовнішній кут у межах від 90 до 180 °, то, звільнивши затискач, знімають кутник 1.

При визначенні величини кута використовують так зване правило штангенциркуля.

В четвертій групі прилади, застосування яких ґрунтується на визначенні розміру сторони прямокутного трикутника (при постійному розмірі іншої сторони) й обчисленні за тригонометричними функціями синуса і тангенса значення шуканого кута. Ці вимірювання проводять на вимірювальних мікроскопах, координатно-вимірювальних машинах, спеціальних пристроях і т. п.

Запитання для самоконтролю до теми 5

1. Які Ви знаєте плоскопаралельні кінцеві міри довжини?
2. Описати роботу со штангенінструментами. Будова і правила користування із штангенінструментами.
3. Мікрометричні інструменти. Описати будову і правила користування.
4. Які види калібрів Ви знаєте? Навести приклади.
5. Індикатори годинного типу. Особливості в роботі.
6. В чому особливість роботи з засобами вимірювання кутів та конусів?

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРИЛАДИ

Тема 6. Вимірювальні сигнали, перетворення вимірювальних сигналів, форми вимірювальної інформації

План

- 6.1. Вимірювальні сигнали та їх характеристика
- 6.2. Процедура вимірювання та вимірювальні операції
- 6.3. Засоби вимірювальної техніки
- 6.4. Різновиди вимірювань
- 6.5. Різновиди методів прямих вимірювань

6.1. Вимірювальні сигнали та їх характеристика

Спочатку наведемо визначення сигналу взагалі.

Сигнал – це фізичний процес, властивості якого визначаються взаємодією між матеріальним об'єктом та засобом його дослідження.

Сигнали характеризуються параметрами.

Параметр сигналу – одна з властивостей, яка є фізичною величиною.

Параметри сигналів розділяють на інформативні та неінформативні.

Інформативний параметр сигналу – параметр сигналу, який функціонально зв'язаний з досліджуваною (вимірюваною) величиною або ж має задане значення.

У протилежному випадку параметр сигналу є *неінформативним*.

Окремий вид сигналів складають вимірювальні сигнали, що виконують функцію взаємозв'язку між об'єктом вимірювання та засобом (засобами) вимірювальної техніки.

Вимірювальним сигналом називають сигнал, один чи декілька параметрів якого є інформативними.

Розрізняють вхідні вимірювальні сигнали та сигнали вимірювальної інформації.

Вхідний вимірювальний сигнал – це вимірювальний сигнал, який подається на вхід засобу вимірювальної техніки з виходу об'єкта вимірювання чи джерела вимірювального сигналу або з виходу останнього на вхід об'єкта вимірювання.

Вимірювальний сигнал, що утворюється на виході джерела вимірювального сигналу, називають зразковим сигналом. Під *зразковим*

сигналом розуміють вимірювальний сигнал, один чи декілька параметрів якого мають задані значення.

Сигнал вимірювальної інформації – це вимірювальний сигнал, який представляє вимірювальну інформацію на виході засобу вимірювальної техніки.

Сигнали вимірювальної інформації розділяють на візуальні та кодові. *Візуальним* називають сигнал вимірювальної інформації, який сприймається оператором візуально. *Кодовим* називають сигнал вимірювальної інформації, який представляється заданим кодом і призначається для сприйняття технічними засобами.

6.2. Процедура вимірювання та вимірювальні операції

Вимірювання виконуються за процедурою, яка визначається методикою виконання вимірювань.

Процедура вимірювання – це послідовність вимірювальних операцій, що забезпечує вимірювання згідно з обраним методом.

Таким чином, процедура вимірювання складається з вимірювальних операцій.

Вимірювальна операція – це операція з фізичними величинами або їх значеннями під час вимірювання.

До вимірювальних операцій належать: відтворення фізичної величини, порівняння фізичних величин і вимірювальне перетворення.

Відтворення фізичної величини – вимірювальна операція, що полягає у створенні та (чи) зберіганні фізичної величини заданого значення.

Порівняння фізичних величин – вимірювальна операція, що полягає у порівнянні двох розмірів (значень) однорідних фізичних величин.

Вимірювальне перетворення фізичних величин – вимірювальна операція, під час якої одна фізична величина перетворюється в іншу, функціонально з нею зв'язану.

Фізичний ефект, на якому ґрунтується вимірювальне перетворення, називають *принципом вимірювального перетворення*.

Вимірювальні перетворення поділяють на перетворення без зміни роду та зі зміною роду вихідної фізичної величини, а також на лінійні та нелінійні за видом функціональної залежності (лінійна чи нелінійна) між початковою величиною й тією величиною, що одержують після перетворення. Одним з поширених видів лінійного перетворення фізичної величини є *масштабне*

вимірювальне перетворення, під яким розуміють лінійне вимірювальне перетворення фізичної величини без зміни її роду.

6.3. Засоби вимірювальної техніки

1. Визначення і різновиди засобів вимірювальної техніки. Засоби вимірювальної техніки є обов'язковим елементом будь – якого процесу вимірювання. Більш того, вони значною мірою визначають його якість, оскільки саме ЗВТ забезпечують зберігання одиниць вимірювань і їх порівняння з розміром вимірюваної величини, тобто виконання основних вимірювальних операцій. Проте в ряді практичних випадків для здійснення вимірювального експерименту, крім ЗВТ, необхідні й інші технічні засоби, які забезпечують, зокрема, підтримання умов виконання вимірювань, збирання, зберігання і передавання вимірювальної інформації, виконання обчислень тощо.

На теперішній час *вимірювальна техніка* – це величезний парк різноманітних ЗВТ з різними технічними і метрологічними характеристиками. Особливо важливими для процесу вимірювання є метрологічні характеристики, тому що вони впливають на результат і похибку вимірювання. Всі метрологічні характеристики ЗВТ підлягають нормуванню, під яким розуміють задання номінальних значень і границь допустимих відхилень реальних метрологічних характеристик ЗВТ від номінальних значень. Засоби вимірювальної техніки можна використовувати для виконання вимірювань тільки за умови, коли відомі їхні метрологічні характеристики. Ця вимога настільки важлива, що вона введена у визначення засобу вимірювальної техніки.

Засіб вимірювальної техніки – це технічний засіб (або стандартний зразок), який застосовується під час вимірювань і має нормовані (задані) метрологічні характеристики.

Засоби вимірювальної техніки розподіляють на типи.

Тип засобу вимірювальної техніки – сукупність засобів вимірювальної техніки однакового призначення, які мають однаковий принцип дії, однакову конструкцію та виготовлені за однією технологічною документацією.

Вимоги до ЗВТ, як правило, регламентуються нормативною документацією. Такі ЗВТ називають *стандартизованими*. Засоби вимірювальної техніки, вимоги до яких не регламентуються відповідно до нормативної документації, називають *нестандартизованими*.

Залежно від області (масштабу) застосування відрізняють ЗВТ загального застосування і спеціальні (сервісні) ЗВТ. До *ЗВТ загального застосування* належать ЗВТ, які розробляються і випускаються для загальнодержавного і відомчого застосування. *Спеціальні (сервісні) ЗВТ* мають вузькоцільове призначення, розробляються і використовуються в системі технічного обслуговування конкретного об'єкта або групи об'єктів вимірювання. Вони можуть бути вбудованими (вмонтованими) і зовнішніми. До ЗВТ, умонтованих в об'єкти вимірювання, ставляться ті самі вимоги щодо захищеності від зовнішніх впливів, які установлені для даного об'єкта з урахуванням застосованих у них засобів захисту.

Усі ЗВТ можна розподілити на дві основні групи за такими ознаками: функціональне призначення та метрологічне забезпечення.

2. Різновиди засобів вимірювальної техніки за функціональним призначенням. За функціональним призначенням розрізняють три різновиди ЗВТ: засоби вимірювань, вимірювальні пристрої і еталони (рис.6.1).

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

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

Визначення еталона і його різновиди наведені в темі 3.

Засоби вимірювань поділяють на вимірювальні прилади, кодові засоби вимірювань, реєструвальні засоби вимірювань, вимірювальні канали, вимірювальні системи і вимірювальні інформаційні системи.

Вимірювальний прилад – засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Кодовий засіб вимірювань (аналого–цифровий перетворювач) – засіб вимірювань, в якому створюється кодовий сигнал вимірювальної інформації.

На наш погляд (на відміну від ДСТУ 2681–94), поняття кодового засобу вимірювання і аналого-цифрового перетворювача (АЦП) не є ідентичними.

Перше з них значно ширше, ніж друге, оскільки поняття коду (і кодового сигналу) значно ширше за поняття цифрового коду. Тому АЦП слід віднести до вимірювальних пристроїв. Крім того, в такому розумінні кодові засоби вимірювань охоплюють цифрові вимірювальні прилади, і останні треба розглядати як різновид кодових засобів вимірювань.

3. Реєструвальний засіб вимірювань – засіб вимірювань, в якому реєструється сигнал вимірювальної інформації.

Реєструвальні ЗВ забезпечують можливість автоматичного документування результатів вимірювань шляхом їх запису в аналоговій формі (самописні ЗВ, наприклад сейсмографи, барографи, світлопроменеві осцилографи) або друкування в цифровій формі (наприклад, цифрові вимірювальні прилади, сполучені з цифродрукувальним пристроєм). При цьому може відображатися залежність вимірюваної величини у функції часу (наприклад, перехідний процес в електричному колі) або у функції іншої величини (частотні характеристики динамічних об'єктів та ін.).

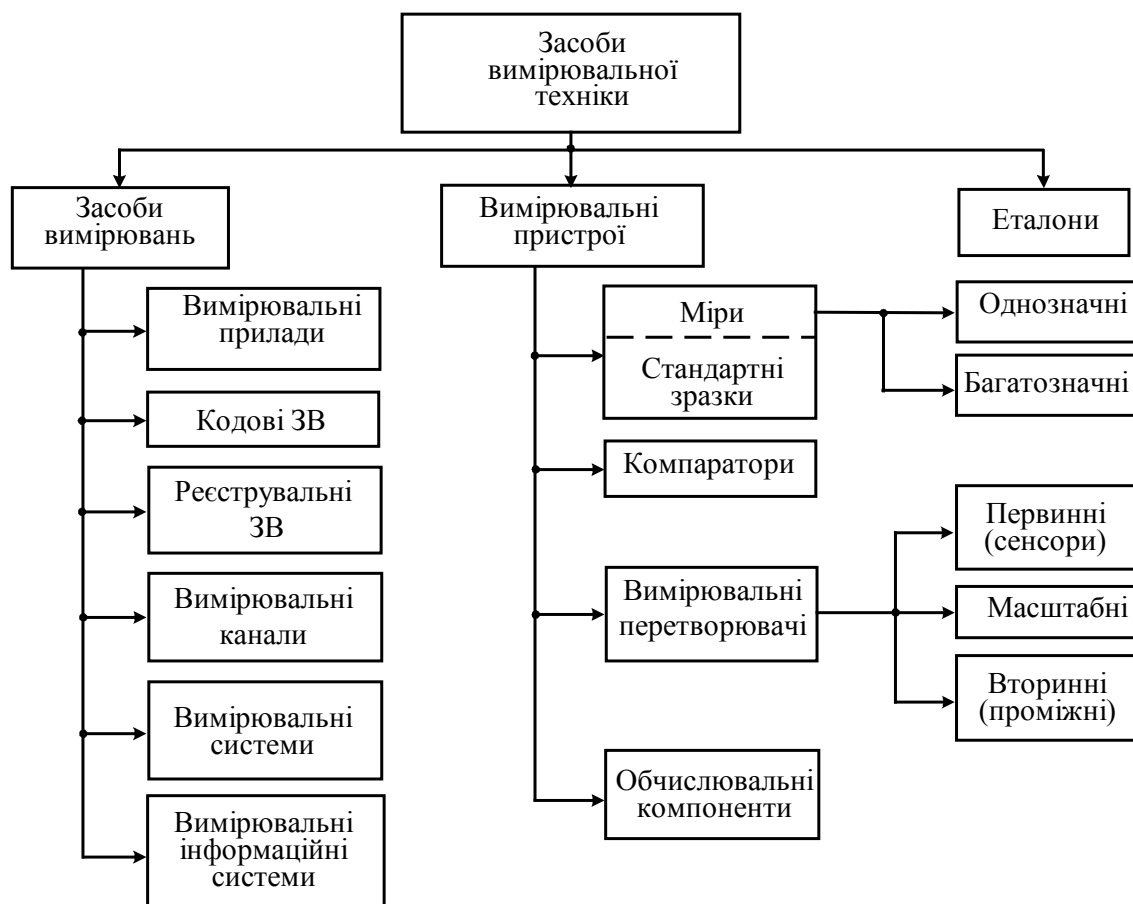


Рис. 6.1. Класифікація засобів вимірювальної техніки

Вимірювальний канал – сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів передавання і зберігання інформації та інших технічних засобів, функціонально об'єднаних для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану фізичну величину.

Вимірювальна система – сукупність вимірювальних каналів, окремих засобів вимірювальної техніки, засобів збирання, передавання і зберігання

інформації та інших технічних засобів, функціонально об'єднаних для створення сигналів вимірювальної інформації про декілька вимірюваних фізичних величин.

Вимірювальна інформаційна система – сукупність вимірювальних каналів, окремих засобів вимірювальної техніки, контролю і діагностики, засобів збирання, передавання, зберігання і обробки інформації, інших технічних засобів, функціонально об'єднаних для створення сигналів вимірювальної та інших видів інформації.

Відзначимо, що в науково-технічній літературі використовуються різноманітні терміни, подібні до вимірювальної системи або до вимірювальної інформаційної системи, наприклад: вимірювальна установка, вимірювально-обчислювальна система, вимірювально-обчислювальний комплекс, вимірювальна контролююча система, вимірювальна керуюча система. Усі вони, по суті, є різновидом вимірювальних систем та вимірювальних інформаційних систем і забезпечують автоматизацію процесів вимірювання, обробки і відображення результатів вимірювання, контролю і діагностики, а іноді введення вимірювальної інформації в автоматизовані системи управління.

Вимірювальні пристрої за функціональним призначенням поділяють на міри, компаратори, вимірювальні перетворювачі і обчислювальні компоненти.

Міра фізичної величини – вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) зберігання фізичної величини одного або декількох заданих значень.

Розрізняють однозначні і багатозначні міри, набори і магазини мір.

Однозначною називається міра, яка відтворює фізичну величину одного значення (наприклад, нормальний елемент, зразкова котушка опору). *Багатозначна міра* забезпечує відтворення фізичної величини декількох значень (наприклад, штрихова міра довжини, конденсатор змінної ємності).

У ряді випадків для розширення можливостей відтворення фізичної величини різних значень використовують набори однозначних мір, різні комбінації яких дозволяють одержати потрібне значення фізичної величини. Прикладом набору мір є набори плоско паралельних кінцевих мір довжини. Якщо набір мір конструктивно об'єднаний в єдиний блок, то він називається *магазином мір* (наприклад, магазин електричних опорів, магазин індуктивностей, магазин ємностей).

Окремим видом мір є стандартні зразки.

Стандартний зразок – міра у вигляді речовини або матеріалу зі встановленими в результаті метрологічної атестації значеннями однієї або декількох фізичних величин, що характеризують властивості або склад цієї речовини чи матеріалу.

Розрізняють *стандартні зразки властивостей* і *стандартні зразки складу*.

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

Компаратори можуть виконуватися у вигляді технічних засобів або спеціально створених середовищ. Вони широко використовуються не тільки у вимірювальних приладах, але й для звіряння еталонів і мір однорідних фізичних величин або ж показів вимірювальних приладів, наприклад: компаратор електрорушійної сили; частотний компаратор; температурне поле, що створюється термостатом для звіряння показів термометрів; рідина з відомою густиною, яка використовується для звіряння ареометрів і т.д. Компаратори, строго кажучи, не є класичними ЗВТ, тому вони не мають загальноприйнятих метрологічних характеристик. Їх основною характеристикою є чутливість або поріг чутливості. Одночасно вони істотно впливають на точність виконуваних за їх участю вимірювань, оскільки результати порівняння часто становлять основу для прийняття рішення про метрологічну справність ЗВТ при повірках. Компаратори конструктивно можуть виконуватися у вигляді автономних приладів. У цьому випадку їм надають букво-цифрове позначення, наприклад, компаратор частоти типу Ч7-12.

Вимірювальний перетворювач – вимірювальний пристрій, що реалізує операцію вимірювального перетворення.

Поняття вимірювального перетворення використовується в усіх без винятку галузях вимірювальної техніки, ставши одним з основних початкових положень. Вимірювальні перетворення складають етапи вимірювального процесу – від сприйняття фізичної величини до формування і подання її числового значення в тій чи іншій формі. З цієї точки зору можна виділити такі основні операції одержання і передавання вимірювальної інформації:

а) первинне сприйняття і виділення вимірюваної фізичної величини з одночасним формуванням сигналу вимірювальної інформації;

- б) функціональне перетворення сигналу вимірювальної інформації;
- в) подання вимірювальної інформації у тій чи іншій формі сповіщення (число, кодовий сигнал, діаграма і т.д.).

Послідовне перетворення вимірювальних сигналів є практично єдиним методом, на основі якого може бути побудований будь – який вимірювальний канал (приладу, установки або системи). Тому вимірювальний канал можна подати як ланцюг вимірювальних перетворювачів. Такий підхід в основному і використовується як при аналізі, так і при синтезі вимірювальних каналів ЗВТ.

Вимірювальні перетворювачі знаходять самостійне застосування, а також як основні компоненти входять до складу інших ЗВТ. Вони поділяються на різновиди за двома ознаками: за місцем у вимірювальному ланцюзі та за видом здійснюваного перетворення. За першою ознакою розрізняють первинні й вторинні (проміжні) вимірювальні перетворювачі.

Первинний вимірювальний перетворювач (сенсор) – вимірювальний перетворювач, який першим взаємодіє з об'єктом вимірювання.

Первинні вимірювальні перетворювачі, конструктивно відособлені від ЗВТ і установлені на об'єктах вимірювання, що розміщуються на відстані від пристрою обробки, відображення і реєстрування вимірювальної інформації, називають *датчиками* (наприклад, датчик температури, датчик вібрації, датчик іонізуючого випромінювання тощо).

Вимірювальні перетворювачі, що здійснюють проміжні перетворення вимірювальної інформації, тобто розташовані у вимірювальному каналі після первинного перетворювача, називають *вторинними вимірювальними перетворювачами*.

Вимірювальні перетворювачі, які виконують лінійне змінювання (зменшення або збільшення) значення фізичної величини у визначену кількість разів, називають *масштабними вимірювальними перетворювачами*. До них належать подільники напруги, додаткові резистори та шунти, підсилювачі та атенюатори, вимірювальні трансформатори струму і напруги.

За видом перетворення сигналів вимірювальної інформації вимірювальні перетворювачі розділяють на аналогові, аналого-цифрові і цифроаналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП відповідно).

Аналогові вимірювальні перетворювачі перетворюють аналоговий сигнал в інший аналоговий сигнал, однорідний або різнорідний з початковим (вхідним) сигналом (наприклад, амплітудний детектор перетворює амплітуду

змінної напруги в пропорційну постійну напругу, термоелектричний перетворювач – температуру в електричну напругу). АЦП здійснює перетворення аналогового сигналу в цифровий код, наприклад двійковий. ЦАП служить для зворотної операції перетворення – цифрового коду в безперервну напругу або струм.

Якщо вимірювальний перетворювач виконується у вигляді автономного блока (модуля), то йому присвоюється відповідно букво – цифрове позначення, наприклад, підсилювач УЗ-28, АЦП Ф-7070 і т.д.

Обчислювальний компонент ЗВТ (числовий вимірювальний перетворювач) – вимірювальний пристрій, що є сукупністю засобу (засобів) обчислювальної техніки та програмного забезпечення і виконує обчислювальні операції процедури вимірювань.

Обчислювальний компонент можна розглядати як різновид вимірювальних перетворювачів за видом здійснюваного перетворення, що є доцільним при оцінці похибок вимірювальних каналів.

Інколи не обов'язково знати числове значення вимірюваної величини, яке характеризує ту чи іншу властивість об'єкта або явища, а досить виявити якимось чином цю властивість. Для даної мети використовують індикатори.

Індикатор – технічний пристрій або речовина, який за наявності певної властивості об'єкта чи явища створює відповідний сигнал інформації.

Індикатори не належать до ЗВТ, але окремі види ЗВТ можуть використовуватися як індикатори. Наприклад, магнітний компас – індикатор напруженості магнітного поля, освітлювальна електрична лампа – індикатор електричної напруги, лакмусовий папір – індикатор активності іонів водню в розчинах.

Таким чином, за допомогою індикаторів встановлюється тільки наявність вимірюваної фізичної величини, тобто тієї чи іншої властивості об'єкта або явища. У цьому відношенні індикатори відіграють ту саму роль, що й органи чуттів людини, але значно розширюють їх можливості. Оскільки індикатори мусять лише реагувати на виявлення певних властивостей навколишнього світу, то найважливішою їхньою технічною характеристикою є поріг реагування (або поріг чутливості). Чим він менший, тим слабкіше проявлення контрольованої властивості реєструється індикатором.

Деякі сучасні індикатори володіють дуже малими порогами чутливості, які знаходяться на рівні фонових полів і власних шумів апаратури.

Для технічної реалізації процесу вимірювання звичайно потрібні не тільки ЗВТ, а й інші технічні засоби, їх іноді називають *допоміжними*. Серед них виділяють вимірювальне приладдя, яке безпосередньої участі в одержанні числового значення результату вимірювання не бере, але опосередковано впливає на похибки вимірювання. До приладдя, наприклад, належать пристрої для контролю і підтримки певних умов вимірювання (температури, тиску, газового складу), протівібраційні фундаменти, пристрої екранування від електромагнітних полів тощо.

3. Різновиди засобів вимірювальної техніки за метрологічним призначенням. За метрологічним призначенням ЗВТ розділяють на робочі ЗВТ, зразкові ЗВТ та еталони.

Робочий засіб вимірювальної техніки – засіб вимірювальної техніки, що застосовується для вимірювань, не зв'язаних з передаванням розміру одиниці вимірювань іншим засобам вимірювальної техніки.

Залежно від області застосування (класу вирішуваних задач вимірювання) робочі ЗВТ можуть бути лабораторними, виробничими і польовими. Лабораторні ЗВТ використовуються при наукових дослідженнях, розробці технічних засобів, медичних вимірюваннях тощо. Звичайно вони мають найбільш високі метрологічні характеристики серед робочих ЗВТ. Виробничі ЗВТ застосовуються для вимірювання і контролю параметрів технологічних процесів та технічного стану виробничого обладнання, для контролю показників якості готової продукції тощо. Польові ЗВТ використовуються для експлуатаційних вимірювань і контролю параметрів таких технічних об'єктів, як літаки, автомобілі, кораблі та ін. До польових, звичайно, належать і вмонтовані робочі ЗВТ, які зазнають зовнішніх впливів, що змінюються в широких межах. До виробничих і польових ЗВТ ставляться в порівнянні з лабораторними ЗВТ більш високі вимоги щодо їх експлуатаційних характеристик (стійкість до ударно – вібраційних навантажень, впливів температури, вологості, радіаційного випромінювання, електромагнітних полів тощо).

Зразковий засіб вимірювальної техніки – засіб вимірювальної техніки, призначений для перевірки інших засобів вимірювальної техніки і затверджений як зразковий.

Зразковий засіб вимірювальної техніки, що має метрологічні характеристики, які відповідають найвищому ступеню даної повірочної схеми, називають *вихідним зразковим засобом вимірювальної техніки*.

Зразкові засоби вимірювальної техніки, в тому числі вихідні, можуть виконуватися у вигляді повірочних установок (та систем), автоматизованих і автоматичних. На відміну від вимірювальних систем (і установок) вони комплектуються зразковими засобами вимірювальної техніки і призначаються для повірки інших засобів вимірювальної техніки.

Засобами вимірювальної техніки найвищої точності є еталони одиниць вимірювань (одиниць фізичних величин).

Еталон одиниці (надалі еталон) – засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці вимірювань одного чи декількох значень, а також передавання розміру цієї одиниці засобам вимірювальної техніки.

Відтворення одиниці вимірювань (одиниці фізичної величини) – відтворення одиниці шляхом створення фіксованої за розміром фізичної величини відповідно до визначення одиниці вимірювань.

Передавання розміру одиниці вимірювань (одиниці фізичної величин) – зведення (доставка) розміру одиниці вимірювань (одиниці фізичної величини), яка відтворюється або зберігається засобом вимірювальної техніки, що повіряється, до розміру тієї самої одиниці, яка відтворюється або зберігається еталоном чи зразковим засобом вимірювальної техніки, при їх звіренні (повірці).

За призначенням і метрологічними характеристиками еталони розділяють на державні, робочі та вихідні.

Державний еталон – офіційно затверджений еталон, який забезпечує відтворення одиниці вимірювань та передавання її розміру іншим еталонам з найвищою в країні точністю.

Державні еталони є виключно державною власністю, підлягають затвердженню Держстандартом України і перебувають у його віданні.

Державні (національні) еталони за міжнародною угодою можуть використовуватися як *міжнародні еталони*, що призначаються для погодження (звірення) розмірів одиниць вимірювань, відтворюваних державними (національними) еталонами різних країн.

Робочий еталон – еталон, призначений для повірки або калібрування засобів вимірювальної техніки.

Вихідний еталон – еталон, який має найвищі метрологічні властивості серед еталонів, що є на підприємстві чи в організації.

Еталони можуть бути одиничними і груповими. До складу *групового еталона* входить декілька (група) одиничних еталонів або (та) зразкових засобів вимірювальної техніки тієї самої фізичної величини.

Еталонна база створюється та вдосконалюється згідно з державними науково – технічними програмами, які розробляються Держстандартом України з метою забезпечення потреб науки, економіки і оборони. За виконання завдань цих програм, технічний рівень державних еталонів та оптимальність структур еталонної бази відповідає Держстандарт України.

4. Класифікація вимірювальних приладів. Вимірювальні прилади є найбільш розповсюдженим видом ЗВ. У систему їх класифікації покладені такі основні ознаки: рід вимірюваної фізичної величини, призначення, елементна база, спосіб одержання значення вимірюваної величини, спосіб обробки вимірювальної інформації, захищеність від впливу зовнішніх умов.

Залежно від вимірюваних фізичних величин вимірювальні прилади, як і вимірювання (див. § 1.5), розділяють на види. Кожний *вид вимірювальних приладів* об'єднує прилади, призначені для вимірювання величин, які близькі за фізичною природою або належать до певної галузі науки і техніки. Наприклад: вимірювальні прилади для вимірювання електричних величин (електровимірювальні прилади), вимірювальні прилади для вимірювання радіотехнічних величин (радіовимірювальні прилади), вимірювальні прилади для вимірювання температури, тиску і т.д.

У межах виду вимірювальні прилади розділяють на типи, як і ЗВТ в цілому. Вимірювальні прилади даного типу можуть мати модифікації, які відрізняються, наприклад, діапазоном вимірювань. Вид вимірювального приладу може включати декілька типів.

За призначенням вимірювальні прилади розділяють на амперметри, вольтметри, частотоміри, фазометри, ватметри та ін.

За елементною базою, яка використана для їх побудови, вимірювальні прилади розділяють на електромеханічні та електронні.

Електромеханічні вимірювальні прилади ґрунтуються на перетворенні енергії електромагнітного поля в механічну енергію переміщення рухомої частини приладу за допомогою електромеханічних перетворювачів. Для розширення можливостей вимірювання різних фізичних величин в електромеханічних приладах застосовують попередні перетворювачі, наприклад випрямлячі, термоперетворювачі. Вони утворюють групу електромеханічних вимірювальних приладів з перетворювачами.

До електронних належать вимірювальні прилади, в яких перетворення сигналів у вимірювальних каналах здійснюється за допомогою електронних вузлів, виконаних на електронних і напівпровідникових приладах, а також на інтегральних мікросхемах різного ступеня інтеграції, у тому числі на мікропроцесорах.

Усі радіовимірювальні прилади є, як правило, електронними або радіоелектронними і рідше електромеханічними з попередніми перетворювачами.

За методом вимірювання (або за участю міри у вимірюваннях) розрізняють вимірювальні прилади прямої дії і вимірювальні прилади порівняння.

Вимірювальні прилади прямої дії (або безпосередньої оцінки) ґрунтуються на одному або декількох послідовних перетвореннях вимірювального сигналу в одному напрямку, тобто без застосування негативного зворотного зв'язку з виходу на вхід приладу.

Такі прилади обов'язково потребують градуювання шкали показувального пристрою, під яким розуміють нанесення на шкалу позначок, що відповідають одному або декільком значенням вимірюваної фізичної величини. При цьому міра, яка відтворює одиницю вимірювань, необхідну для здійснення вимірювання, бере участь тільки в процесі градуювання показувального пристрою, який потім і забезпечує зберігання одиниці в процесі вимірювань.

У вимірювальних приладах порівняння (або зрівноважування) результат вимірювання одержують порівнянням розміру вимірюваної величини з розміром величини, що відтворюється мірою (вмонтованою або зовнішньою). Достоїнством вимірювальних приладів порівняння є те, що їх похибка визначається в основному похибкою застосованої міри, а отже, удосконалення мір приводить до підвищення точності приладу в цілому.

Прилади порівняння виконуються за мостовою або компенсаційною схемами, які в процесі вимірювань піддаються автоматичному або ручному зрівноважуванню. В приладах порівняння з автоматичним зрівноважуванням обов'язково є негативний зворотний зв'язок з виходу на вхід приладу, а в приладах порівняння з ручним зрівноважуванням цю функцію виконує оператор.

Компенсаційні прилади порівняння в момент вимірювання, якому відповідає рівність значень вимірюваної і зрівноважувальної величин,

потужність від об'єкта вимірювання не споживають, що є їх важливим достоїнством.

За формою відліку показів вимірювальні прилади розподіляють на аналогові і цифрові.

Аналогові вимірювальні прилади – це вимірювальні прилади, показання яких є безперервною функцією часу, а точніше – функцією змінювання вимірюваної величини в часі. В їхньому вимірювальному каналі може здійснюватися перехід від безперервного сигналу до дискретного і навпаки. Візуальний сигнал вимірювальної інформації в них подається за допомогою шкали та вказівника.

Цифрові вимірювальні прилади – це вимірювальні прилади, що автоматично виробляють дискретні сигнали вимірювальної інформації і покази яких подані у цифровій формі. Ці покази є дискретною функцією часу і змінювання вимірюваної величини за рівнем.

Для зменшення впливу зовнішніх факторів у вимірювальних приладах передбачається захист від кліматичних і механічних дій. За ступенем захищеності ці прилади виготовляють звичайними, пило– , водо– , бризкозахищеними, герметичними, віброударостійкими і т.д.

6.4. Різновиди вимірювань

Теперішнього часу в силу великої різноманітності вимірюваних фізичних величин і вимог до якості вимірювань для їх здійснення використовують різні методи. Правильне і глибоке розуміння суті методів вимірювань дозволяє організувати процес вимірювання так, щоб якнайкраще забезпечити виконання дуже суперечливих вимог щодо точності, часових і апаратурних витрат.

Незважаючи на чисельність методів вимірювань, можна виділити властиві їм спільні ознаки, за якими вимірювання розділяють на характерні різновиди. До найбільш поширених належать такі ознаки: фізична природа вимірюваних величин, функціональна залежність між шуканою і безпосередньо вимірюваною величинами, характер змінювання вимірюваної величини в часі, спосіб подання результату вимірювання, наявність попереднього (проміжного) вимірювального перетворення, кількість вимірювань у серії, характеристика точності, призначення вимірювань (рис. 6.4).

За фізичною природою вимірюваних величин вимірювання розподіляють на області і види. Під областю вимірювань фізичних величин розуміють

фізичні величини, які властиві певній галузі науки та техніки й виділяються своєю специфікою. *Вид вимірювань* є частиною області вимірювань, що має свої особливості й відрізняється однорідністю вимірюваних величин. Поділ вимірювань на області та види не є постійним, він залежить від об'єктивних і суб'єктивних факторів. Наведемо один із варіантів такого поділу вимірювань, прийнятий Держстандартом України:

- вимірювання геометричних величин;
- вимірювання механічних величин;
- вимірювання параметрів потоку, витрат, рівня й об'єму речовин;
- вимірювання тиску, вакуумні вимірювання;
- вимірювання оптичних і оптико-фізичних величин;
- вимірювання теплофізичних величин і температури;
- вимірювання часу і частоти;
- вимірювання електричних і магнітних величин;
- вимірювання в радіоелектроніці;
- вимірювання акустичних величин;
- вимірювання фізико-хімічного складу і властивостей речовин;
- вимірювання характеристик іонізуючих випромінювань і ядерних констант.

Функціональна залежність між шуканою і безпосередньо вимірюваними величинами є однією з дуже важливих ознак, оскільки вид цієї залежності визначає вибір методу обробки результатів вимірювань при оцінці їхньої точності. *За цією ознакою вимірювання розподіляють на прямі й непрямі.*

Прямим називають вимірювання, при якому значення однієї фізичної величини знаходять безпосередньо з дослідних даних за показом вимірювального приладу без перетворення роду фізичної величини і обчислень поза приладом. Рівняння прямого вимірювання має вигляд:

$$Y = X, \quad (6.1)$$

де Y – результат вимірювання (шукане значення фізичної величини);
 X – значення вимірюваної величини, одержане з дослідних даних.

Прикладом прямих вимірювань є вимірювання довжини лінійкою, струму – амперметром, опору – омметром і т.д. До прямих належать вимірювання, при яких результат вимірювання одержують статистичною обробкою дослідних даних (багаторазових вимірювань одного і того самого розміру вимірюваної фізичної величини).

Непряме вимірювання – вимірювання, при якому значення однієї чи декількох вимірюваних фізичних величин знаходять за результатами прямих вимірювань інших фізичних величин, однорідних або неоднорідних, шляхом обчислень за відомими залежностями або після вимірювальних перетворень поза вимірювальними приладами. Результати прямих вимірювань, що є проміжними для отримання потрібних результатів вимірювань, називають *аргументами*.



Рис.6.4. Класифікація вимірювань

Отже, загальною особливістю непрямих вимірювань є те, що вони виконуються за два етапи: на першому етапі визначаються аргументи, а на

де $Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m$ – результати сукупних вимірювань;

$X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_k^{(i)}$ – результати безпосередніх вимірювань, що одержують прямими або опосередкованими вимірюваннями в i -му досліді, $i = \overline{1, n}$.

Для визначення m вимірюваних величин Y_1, Y_2, \dots, Y_m необхідно, щоб кількість рівнянь n дорівнювала або була більшою за кількість m невідомих величин $Y_j, j = \overline{1, m}$. Розв'язання системи (6.3) відносно кожної з вимірюваних величин Y_j являє собою функцію, тому окремий результат вимірювання величини Y_j можна розглядати як результат опосередкованого вимірювання.

Приклад сукупних вимірювань. Нехай треба виміряти опори трьох резисторів R_1, R_2, R_3 , що з'єднані зіркою (рис. 6.5), загальна точка 0 якої, за умовами вимірювань, недоступна.

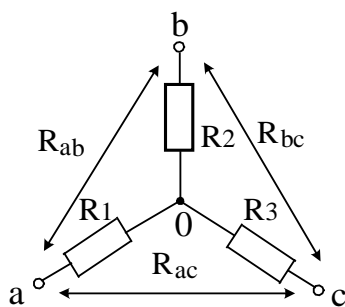


Рис. 6.5. До пояснення методу сукупних вимірювань

Вимірювання опорів R_1, R_2, R_3 виконують так: безпосередньо вимірюють опори між точками a – b , b – c , c – a схеми і складають систему трьох рівнянь:

$$\begin{cases} R_{ab} = R_1 + R_2; \\ R_{bc} = R_2 + R_3; \\ R_{ca} = R_3 + R_1. \end{cases}$$

Розв'язання цієї системи рівнянь дає значення шуканих опорів R_1, R_2, R_3 .

Сумісне вимірювання – це непряме вимірювання, коли значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних фізичних величин отримують розв'язанням системи рівнянь, що зв'язують ці величини з іншими різнорідними фізичними величинами, вимірюваними прямо чи опосередковано. Сумісні вимірювання використовуються частіш за все для знаходження сталих (коефіцієнтів) у функціональних залежностях між різнорідними фізичними величинами.

У загальному випадку сумісні вимірювання можуть бути описані системою рівнянь (6.3). На відміну від сукупних вимірювань при сумісних вимірюваннях величини Y_1, Y_2, \dots, Y_m та $X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_k^{(i)}$ є різнорідними.

Приклад сумісних вимірювань. Треба визначити залежність опору резистора R_t від температури t : $R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$. Для цього потрібно знати

опір R_0 резистора при початковій температурі $t_0 = 0$ °C і сталі коефіцієнти α і β . Для знаходження цих трьох невідомих ($Y_1 = R_0$; $Y_2 = \alpha$; $Y_3 = \beta$) складається система трьох рівнянь за результатами вимірювання опору R_t резистора при трьох різних значеннях температури t ($X_1 = R_{t_1}$; $X_2 = R_{t_2}$; $X_3 = R_{t_3}$).

Визначення прямих і непрямих вимірювань потребують деяких пояснень. Насамперед необхідно вказати, що всі вимірювання аргументів X_1, X_2, \dots, X_k здійснюються в однакових, строго визначених умовах, і результат (результати) непрямих вимірювань мусить бути прив'язаний до цих умов. Якщо це уточнення не брати до уваги, то до непрямих вимірювань формально будуть належати будь – які розрахунки одних величини за їх відомими залежностями від інших величин, значення яких можуть бути взяті, наприклад, із довідників (протоколів), складених на основі вимірювань у різні минулі роки, за різних умов, різними експериментаторами і різними ЗВТ. Саме тут, мабуть, знаходиться межа між непрямими вимірюваннями і розрахунками взагалі (наприклад, розрахунки механічної міцності будь – якого об'єкта на основі даних про механічні властивості матеріалів, узятих із довідника).

Слід також звертати увагу на те, що найчастіше у вимірювальних приладах і системах реалізуються принципи будови, при яких на вхід вимірювального каналу (або його первинний вимірювальний перетворювач) діє не безпосередньо вимірювана величина, а деяка інша фізична величина (або декілька фізичних величин), зв'язана з вимірюваною величиною (величинами) відомою залежністю (залежностями). При цьому для зручності вимірювань шкалу засобу вимірювання градуують в одиницях вимірюваної величини (величин).

Приклад 1. Висотомір реалізує рівняння:

$$P = f(h, t, W), \quad (6.4)$$

де P – абсолютний тиск; h – висота; t і W – температура і вологість атмосфери. Тобто він безпосередньо вимірює абсолютний тиск, а шкала його градуйована в одиницях висоти (довжини).

Нема потреби з метрологічних позицій ускладнювати поняття "непрямі вимірювання" і зводити в нього два підвиди: непрямі вимірювання, при яких вимірювана величина визначається обчисленнями за результатами прямих вимірювань аргументів, і непрямі вимірювання, при яких вимірювана величина

визначається без обчислень, а безпосередньо зі шкали засобу вимірювання, як у прикладі з висотоміром. Оскільки у другому випадку результати вимірювань визначаються безпосередньо за показами вимірювальних приладів, їх треба віднести до прямих вимірювань. У цьому не просто термінологічна формальність, а досить принциповий момент з точки зору похибок. У першому випадку, при визначенні результату вимірювання шляхом обчислень за відомими функціональними залежностями, аргументами яких є результати прямих вимірювань, необхідно врахувати похибки розрахунків. У другому випадку, коли функціональна залежність між вимірюваними величинами і аргументами закладена "всередину" приладу, нема потреби (і можливості) окремо визначати похибку розрахунків: вона входить у похибку вимірювального приладу.

За характером зміни вимірюваної величини (або залежності вимірюваної величини) в часі розрізняють статичні і динамічні вимірювання.

До *статичного вимірювання* належить вимірювання, при якому засіб вимірювальної техніки працює в статичному режимі, тобто коли вимірювана величина і відповідний їй сигнал вимірювальної інформації засобу вимірювальної техніки залишаються практично постійними протягом часу вимірювання або часу використання сигналу.

До *динамічного вимірювання* належить вимірювання, яке виконується засобом вимірювальної техніки в динамічному режимі, тобто коли вимірювана величина і відповідний їй сигнал вимірювальної інформації засобу вимірювальної техніки змінюються в часі так, що для одержання результату вимірювання необхідно враховувати ці зміни.

За способом (формою) подання результату вимірювання розділяють на абсолютні та відносні.

Абсолютне вимірювання – це вимірювання, яке приводить до значення (значень) вимірюваної величини (вимірюваних величин), вираженої (виражених) в одиницях цієї величини.

Наприклад, вимірювання сили тяжіння F ґрунтується на вимірюванні основної величини – маси m і використанні фізичної константи – прискорення вільного падіння g : $F = mg$.

Відносне вимірювання – це вимірювання відношення однієї фізичної величини до однорідної фізичної величини, взятої за одиницю, або змінювання величини відносно однорідної величини, взятої за вихідну. Наприклад, вимірювання відносної вологості повітря, яку визначають як

відношення водяних парів в 1 м^3 повітря до кількості водяних парів, що насичують 1 м^3 повітря при заданій температурі.

За наявністю попереднього вимірювального перетворення вимірювання розділяють на безпосередні і з попереднім перетворенням. При *безпосередніх вимірюваннях* фізична величина вимірюється без будь-яких попередніх перетворень шляхом її порівняння з заданою фізичною величиною – мірою, однорідною з вимірюваною. *Вимірювання з попереднім перетворенням* – це вимірювання, при яких вимірювана величина перетворюється в проміжну величину, що може бути відображена заданим розміром і піддається порівнянню.

Залежно від об'єкта вимірювання, його фізичної моделі, властивостей та інших складових процесу вимірювання виконують одноразові (звичайні) або багаторазові (статистичні) вимірювання.

Найбільш розповсюдженими є *одноразові вимірювання*, тобто вимірювання фізичної величини виконані один раз. Проте в цілому ряді практичних випадків, зокрема при використанні результатів вимірювань для прийняття рішень про стан якогось об'єкта або при виконанні вимірювань з підвищеною точністю, вимірювання одного і того самого розміру фізичної величини здійснюються декілька разів, тобто багаторазово. Отже, до *багаторазових вимірювань* слід віднести ті вимірювання, результат яких отримують шляхом обробки результатів повторних вимірювань фізичної величини одного і того самого розміру, виконаних більше трьох разів. Це пояснюється тим, що саме за таких умов для обробки результатів вимірювань можуть бути використані методи математичної статистики. Вимірювання одного і того самого розміру фізичної величини, які повторюються два або три рази, допускається називати дво- або триразовими.

Звернемо увагу на те, що багаторазові вимірювання формально схожі на опосередковані. Проте відносити їх до опосередкованих недоцільно, оскільки результат багаторазових вимірювань одержують шляхом обробки групи (серії) результатів вимірювань однорідної фізичної величини одного і того самого розміру, що не є адекватним визначенню опосередкованих вимірювань.

За характеристикою точності розрізняють рівноточні та нерівноточні багаторазові вимірювання. В першому випадку всі вимірювання в серії (або всі серії вимірювань), які використовуються для визначення результату багаторазових вимірювань, виконуються з однаковою

точністю (похибкою), а в другому випадку окремі вимірювання в серії (або окремі серії вимірювань) – з різною точністю (похибками).

Під серією слід розуміти декілька (більше трьох) послідовно виконаних вимірювань фізичної величини незмінного розміру одними і тими самими методами та ЗВТ, в однакових умовах, одним оператором.

Залежно від призначення вимірювань або від вимог, які ставляться до точності (похибки) вимірювань, останні розділяють на метрологічні (підвищеної точності, прецизійні) і технічні.

Метрологічне вимірювання – це вимірювання, яке виконують за участю еталонів або зразкових ЗВТ з метою відтворення одиниць вимірювань або передавання їх розмірів робочим ЗВТ.

У свою чергу, метрологічні вимірювання поділяють на еталонні та контрольно-перевірні. *Еталонні вимірювання* здійснюються з найбільшою точністю (або найменшою похибкою), яку досягають при існуючому рівні метрології і вимірювальної техніки. До них, наприклад, можуть належати вимірювання фізичних констант та вимірювання при відтворенні основних одиниць вимірювань. *При контрольно-перевірних вимірюваннях* точність (або похибка) обмежується деяким заданим значенням, яке встановлюється нормативно-технічними документами або вибирається, зважаючи на практичну доцільність.

Технічне вимірювання – це вимірювання, яке виконують за участю робочих ЗВТ і не зв'язане з передаванням розмірів одиниць вимірювань. Технічні вимірювання поділяють на *лабораторні*, що виконуються при різних дослідженнях, і *експлуатаційні вимірювання*, метою яких є контроль параметрів об'єктів і технологічних процесів, керування рухом літальних апаратів і транспортних засобів, діагностика захворювань (медичні вимірювання), контроль якості продукції, параметрів середовища проживання (екологічні вимірювання), витрати матеріалів і т.д.

6.5. Різновиди методів прямих вимірювань

Методи прямих вимірювань за участю (із застосуванням) в них міри поділяють на дві групи: методи безпосередньої оцінки і методи, які ґрунтуються на порівнянні вимірюваної фізичної величини з мірою (або просто – методи порівняння) (рис. 6.6).

Методом безпосередньої оцінки називають метод, в якому значення вимірюваної величини визначається безпосередньо за показувальним

пристроєм вимірювального приладу прямої дії. Наприклад, вимірювання напруги вольтметром, частоти – частотоміром.

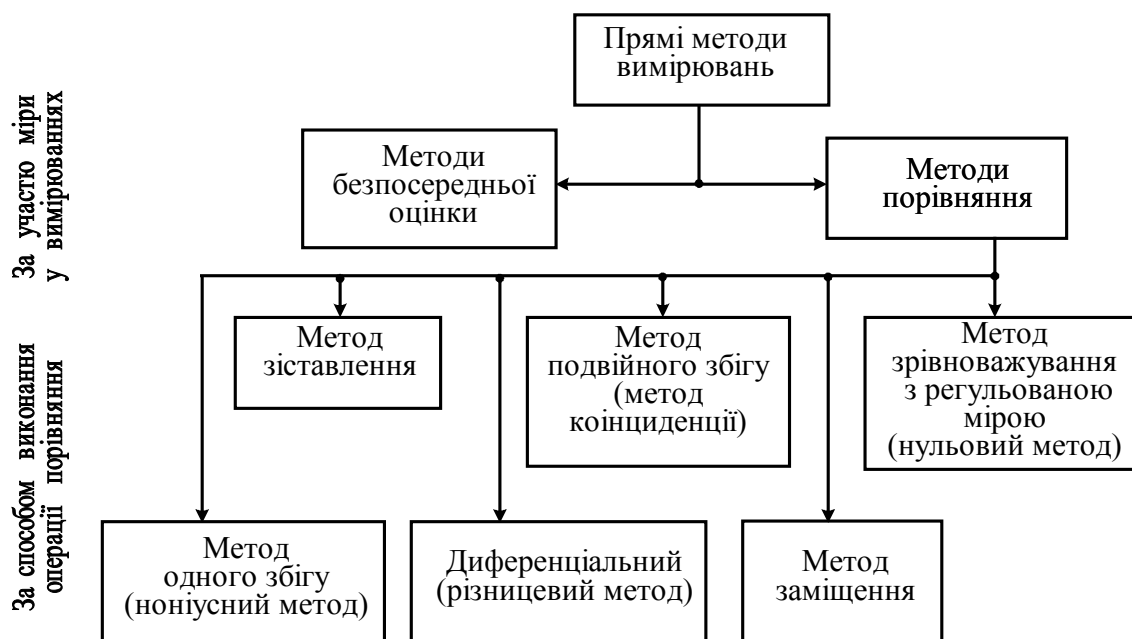


Рис.6.6. Різновиди методів прямих вимірювань

З визначення виходить, що міра безпосередньої участі в процесі вимірювання не бере. Але слід пам'ятати, що вимірювальний прилад прямої дії зберігає одиницю вимірюваної величини, розмір якої був переданий приладу в процесі градування його шкали. Перевагою методу безпосередньої оцінки є малий час, необхідний для виконання вимірювань, і низькі апаратні витрати, оскільки для вимірювань операторові досить мати в розпорядженні тільки вимірювальні прилади. Точність вимірювань даним методом визначається в основному метрологічними характеристиками використаних приладів.

Методи порівняння ґрунтуються на порівнянні вимірюваної величини X з однорідною величиною X_0 , відтвореною мірою. За способом виконання операції порівняння з мірою розрізняють такі різновиди методів прямих вимірювань: метод зіставлення, метод одного збігу (метод ноніуса), метод подвійного збігу (метод коінциденції), метод зрівноважування з регульованою мірою (нульовий метод), диференціальний (різницевий) метод і метод заміщення.

Метод зіставлення полягає в тому, що вимірювана величина одночасно (паралельно) зіставляється (шляхом порівняння) з рівномірною

шкалою (сіткою) значень (рівнів) однорідної зразкової фізичної величини X_0 , які задаються багатозначною нерегульованою мірою (рис. 6.7). Прикладом методу є вимірювання довжини лінійкою.

У деяких цифрових вимірювальних приладах або АЦП паралельної дії зіставлення (або порівняння) виконується автоматично за допомогою компараторів, кількість яких дорівнює кількості рівнів зразкової фізичної величини X_0 .

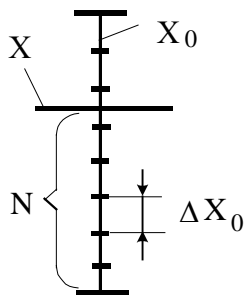


Рис.6.7. До пояснення методу зіставлення

На одні входи компараторів, що об'єднані між собою, подається вимірювана величина X , а на інші входи компараторів подаються відповідні рівні зразкової величини X_0 з багатозначної міри. Залежно від розміру вимірюваної величини X спрацьовує один з компараторів, наприклад, за номером N .

Тоді результат вимірювання визначається рівністю:

$$X = N \times \Delta X_0, \quad (6.5)$$

де ΔX_0 – ступінь (інтервал, дискретність) задання зразкової величини X_0 .

Точність методу зіставлення визначається метрологічними характеристиками багатозначної міри і ступенем ΔX_0 . Найважливішим достоїнством методу є найвища швидкодія в порівнянні з іншими методами, а його значною вадою – велика апаратурна складність (і вартість), що обумовлена використанням багатозначної міри і значної кількості компараторів, яка зростає з підвищенням точності вимірювань, пов'язаним зі зменшенням ступеня ΔX_0 задання зразкової величини.

Метод одного збігу (ноніусний метод) полягає в одноразовому порівнянні зразкових величин двох багатозначних нерегульованих мір X_{01} і X_{02} , які мають різні ступені ΔX_{01} і ΔX_{02} , а їхні нульові позначки зсунуті між собою на вимірювану величину X (або ΔX) (рис. 1.8). Співвідношення між ступенями ΔX_{01} і ΔX_{02} мір установлюється рівністю:

$$\Delta X_{02} = \Delta X_{01} \left(1 - \frac{1}{n} \right) = \Delta X_{01} \frac{n-1}{n} \quad (6.6)$$

де n – число, яке звичайно обирають кратним 10.

Метод застосовується при вимірюванні малих розмірів фізичних величин, коли $X < \Delta X_{01}$. Під X слід розуміти або вимірюваний розмір фізичної величини, або різницю (чи похибку) ΔX між результатом грубого

вимірювання \tilde{X} (за допомогою однієї міри X_{01}) та істинним значенням вимірюваної величини X_i : $\Delta X = \tilde{X} - X_i$. У цьому разі вимірюване значення ΔX використовується як поправка $\Pi = -\Delta X$ до грубого результату вимірювання, уточнюючи його:

$$X_i = \tilde{X} + \Pi = \tilde{X} - \Delta X \quad (6.7)$$

У процесі вимірювання (ручного або автоматичного) визначають номер l перших збіжних рівнів (позначок) обох мір. Тоді:

$$X + l\Delta X_{02} = l\Delta X_{01}, \quad (6.8)$$

звідси результат вимірювання:

$$X = l\Delta X_{01} - l\Delta X_{02} = l(\Delta X_{01} - \Delta X_{02}) = l \frac{\Delta X_{01}}{n} \quad (6.9)$$

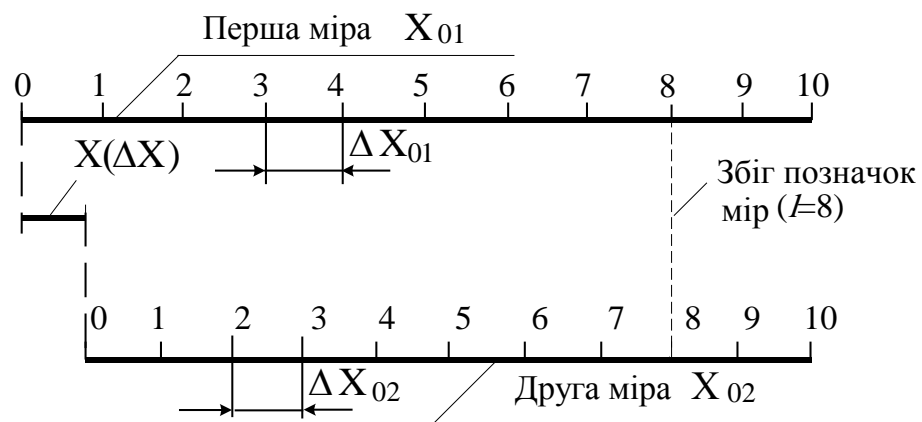


Рис.6.8. До пояснення методу одного збігу (ноніусного методу)

На рис. 6.8: $X_{01} = 10$ мм; $n = 10$; $X_{02} = 9$ мм; $l = 8$ і $X = 8 \cdot 10 / 10 = 8$ мм.

Таким чином, значення ступеня ΔX_{01} першої міри, а отже, і похибка дискретності вимірювання при використанні двох мір зменшується в n разів у порівнянні з використанням тільки однієї міри. Метод застосовується в тих випадках, коли неможливо або недоцільно створювати міру зі ступенем, меншим деякого значення ΔX_0 . Наприклад, практично неможливо створити лінійку з ціною поділки 0,1 мм або менше. Але цю задачу вирішують штангенциркуль і мікрометр, які мають дві шкали – основну і ноніусну.

Метод подвійного збігу (метод коінциденції) полягає в одноразовому порівнянні n зістикованих вимірюваних величин X одного і того самого розміру (рис. 6.9,а) із зразковою величиною X_0 , що відтворюється багатозначною нерегульованою мірою зі ступенем ΔX_0 (рис. 6.9,б).

Результат вимірювання визначається за формулою:

$$X = N \frac{\Delta X_0}{n} \quad (6.10)$$

його абсолютна похибка:

$$DX\phi = NDX_0 - nX. \quad (6.11)$$

При такому вимірюванні зберігається та сама максимальна абсолютна похибка дискретності $\Delta X'_{\max} = \Delta X_0$, що і при вимірюванні однієї вимірюваної величини – X ($\Delta X_{\max} = \Delta X_0$), а це приводить до зменшення максимальної відносної похибки дискретності в n разів:

$$\delta X' = \frac{\Delta X_0}{nX} = \frac{\delta X}{n} \quad (6.12)$$

де $\delta X = \Delta X_0/X$ – максимальна відносна похибка дискретності вимірювання однієї фізичної величини X .

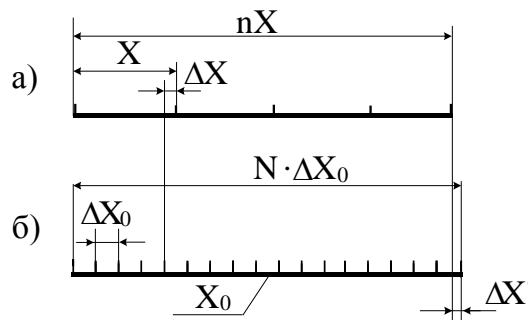


Рис.6.9. До пояснення методу подвійного збігу (методу коінциденції)

Диференціальний (різницевий) метод ґрунтується на безпосередньому вимірюванні невеликої різниці розмірів ΔX вимірюваної величини X і однорідної величини X_0 , що відтворюється мірою (рис. 6.10). Тоді результат вимірювання:

$$X = X_0 + DX, \quad (6.13)$$

де $\Delta X = X - X_0$ – різниця величин X та X_0 на виході різницевого пристрою, яка подається на вимірювальний прилад. Диференціальний метод застосовується в тих випадках, коли розміри X і X_0 є близькими.

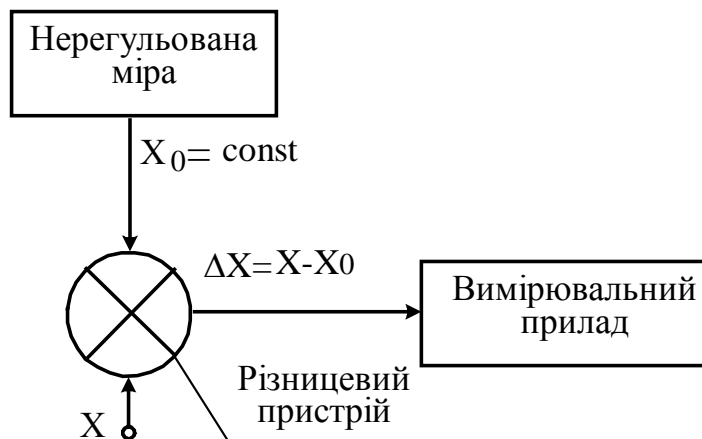


Рис.6.10. До пояснення диференціального різницевого методу

Метод зрівноважування з регульованою мірою (або нульовий метод) полягає в тому, що вимірювана величина X порівнюється із зразковою величиною X_0 , що відтворюється багатозначною мірою, яка регулюється до повного зрівноважування розмірів вимірюваної величини і зразкової величини (рис. 6.11,а). Для фіксації моменту зрівноважування, тобто виконання умови: $\Delta X = X - X_0 = 0$, на виході різницевого пристрою використовується компаратор або нуль – індикатор. Регулювання міри може здійснюватися вручну оператором за показами нуль – індикатора або автоматично (показано пунктиром).

Результат вимірювання: $X = X_0$.

Приклади застосування методу: вимірювання маси на рівноплечих терезах із зрівноважуванням набором гир; вимірювання електричної напруги компенсатором.

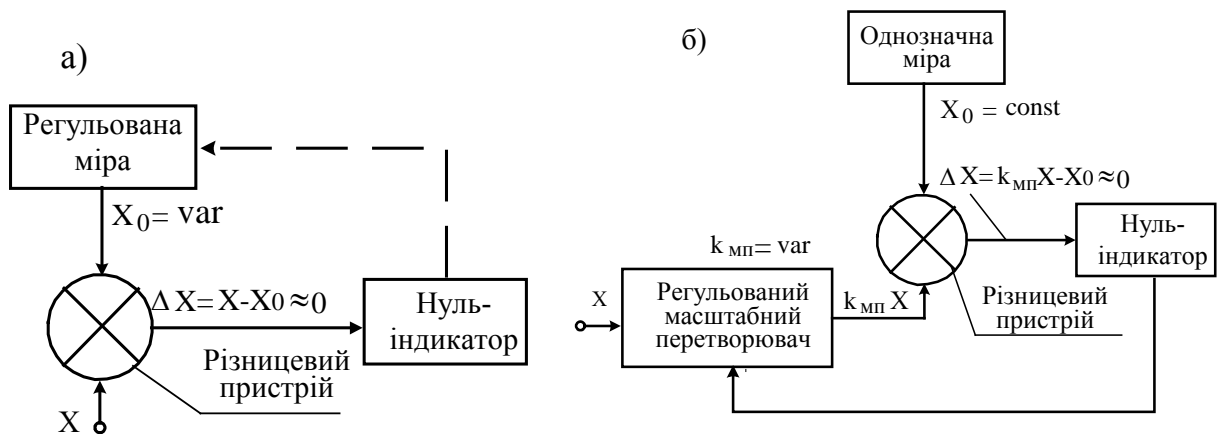


Рис. 6.11. До пояснення методу зрівноважування: а – з регульованою мірою; б – з регульованим масштабним перетворювачем

Другий варіант нульового методу (рис. 6.11,б) полягає в тому, що в процесі вимірювання використовується однозначна нерегульована міра X_0 ($X_0 = \text{const}$), а розмір вимірюваної величини X змінюється за допомогою регульованого масштабного вимірювального перетворювача, змінювання коефіцієнта перетворення $k_{мп}$ якого відбувається до досягнення нульового ефекту на виході різницевого пристрою: $\Delta X = k_{мп} X - X_0 \approx 0$. Тоді результат вимірювання $X = X_0 / k_{мп}$.

Нульовий метод характеризується не тільки малими апаратними витратами, але й значно меншою швидкістю у порівнянні з методом зіставлення, що обумовлено немінучими витратами часу на регулювання міри або масштабного перетворювача. Точність вимірювань цим методом

визначається похибками міри (і масштабного перетворювача в іншому варіанті) та чутливістю різницевого пристрою (або компаратора). Іноді нульовий метод розглядають як різновид диференціального методу.

Метод заміщення – це метод порівняння, в якому вимірювана величина X заміщується величиною X_0 , що відтворюється регульованою мірою (рис.6.12).

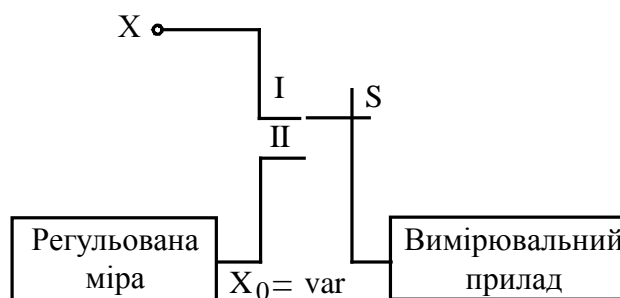


Рис. 6.13. До пояснення методу заміщення

Вимірювання здійснюється за два етапи. На першому етапі до входу вимірювального приладу перемикачем S (положення I) вмикається величина X і фіксується показ вимірювального приладу. На другому етапі вимірювань перемикачем S (положення II) до приладу вмикається вихід міри X_0 і її регулюванням домагаються того самого показу вимірювального приладу, що й на першому етапі. Результат вимірювання одержують з відлікового пристрою міри: $X = X_0$. Точність методу заміщення залежить тільки від похибки міри і практично не залежить від систематичної похибки вимірювального приладу, що є суттєвим достоїнством методу заміщення. Метод використовується у ЗВТ високої точності, в тому числі в еталонах.

Запитання для самоконтролю до теми 6

1. Дайте визначення метрологічного забезпечення, вимірювальної інформації, вимірювання, метрології. Поясніть, як вони взаємозв'язані.
2. Що таке фізична величина, розмір і значення фізичної величини? Чим відрізняються істинне й умовно істинне значення фізичної величини?
3. Що таке результат вимірювання? Як результат вимірювання виражають математично (основне рівняння вимірювань) і чисельно? У чому полягає метрологічна суть вимірювань?
4. Що таке єдність вимірювань і чому потрібно її забезпечувати?
5. Назвіть та охарактеризуйте основні елементи процесу вимірювання, наведіть структурну схему їх взаємодії.

6. Які вимоги ставляться до фізичної моделі об'єкта вимірювання? Наведіть приклади об'єкта вимірювання і його фізичної моделі для двох – трьох досліджуваних об'єктів.

7. Наведіть визначення методу і принципу вимірювання, методики виконання вимірювань. Назвіть основні етапи процесу вимірювання.

8. Дайте визначення системи фізичних величин, наведіть рівняння зв'язку між фізичними величинами. Як розділяють фізичні величини?

9. Що таке розмірність фізичної величини? Як позначають та одержують розмірності фізичних величин (наведіть приклади)?

10. Що таке одиниця вимірювань, або одиниця фізичної величини? Наведіть рівняння зв'язку між одиницями фізичних величин. Як відрізняються одиниці фізичних величин і як вони позначаються (наведіть приклади)?

11. Як установлюються одиниці фізичних величин? Охарактеризуйте систему SI, назвіть її головні достоїнства.

12. Дайте визначення відносних і логарифмічних фізичних величин, наведіть одиниці цих фізичних величин.

13. Що таке кратні і часткові одиниці вимірювань (ОФВ)? Як вони утворюються? Перелічіть множники і префікси десяткових кратних і часткових одиниць, наведіть їх позначення і приклади запису.

14. Дайте визначення засобів вимірювальної техніки. Що є їх принциповою відмінністю від інших технічних засобів? Назвіть ознаки класифікації засобів вимірювальної техніки.

15. Дайте класифікацію і визначення засобів вимірювальної техніки за функціональним призначенням.

16. Дайте класифікацію і визначення засобів вимірювальної техніки за метрологічним призначенням.

17. Наведіть і охарактеризуйте класифікацію засобів вимірювань.

18. Наведіть і охарактеризуйте класифікацію вимірювальних приладів.

19. Наведіть і охарактеризуйте класифікацію вимірювальних пристроїв.

20. Дайте визначення вимірювальної операції та її різновидів.

21. Дайте визначення вимірювальних сигналів та їх різновидів.

22. Наведіть і охарактеризуйте класифікацію вимірювань.

23. Як розділяють прямі методи вимірювань? Поясніть фізичну суть усіх різновидів.

Тема 7. Вимірювальні перетворювачі електричних величин

План

- 7.1. Загальні відомості
- 7.2. Перетворювачі роду вимірюваної величини
- 7.3. Модулятори та демодулятори
- 7.4. Подільники напруги
- 7.5. Вимірювальні трансформатори
- 7.6. Вимірювальні підсилювачі

7.1. Загальні відомості

Завдання, які стоять перед вимірювальними перетворювачами електричних величин, надзвичайно різноманітні. Зокрема, оскільки вхідною величиною вимірювального механізму є струм (напруга), то для вимірювань інших електричних величин необхідне їх функціональне перетворення в величину, яка безпосередньо діє на механізм. Завдання універсальності, підвищення чутливості, а в окремих випадках і точності привели до розробки таких перетворювачів, як випрямлячі, модулятори (перетворювачі постійного струму в змінний). Слід зазначити, що як в модуляторах, так і у випрямних перетворювачах поряд з перетворенням частотного спектра може відбуватися і перетворення роду величини.

Надзвичайно широкий діапазон можливих значень вимірюваних величин (наприклад, сили струму – від 10⁻¹⁶ А до сотень тисяч амперів, напруги – від 10⁻⁸ В до десятків мільйонів вольтів) зумовив необхідність масштабних вимірювальних перетворювачів, тобто таких, що змінюють лише масштаб величини.

Отже, перетворювачі електричних величин можна поділити на перетворювачі роду та частотного спектра вимірюваної величини і масштабні.

Найпоширенішими перетворювачами роду величини є шунти й додаткові резистори відповідно перетворювачі струму в напругу і напруги в струм. Сюди відносять термоелектричні перетворювачі струму в е. р. с. Перетворювачі частотного спектра – це модулятори і демодулятори. Масштабні перетворення здійснюють подільники напруги, вимірювальні трансформатори і підсилювачі.

7.2. Перетворювачі роду вимірюваної величини

Шунти. Шунт являє собою чотирьохзатискачевий резистор, виготовлений з пластинчастого або стержневого манганіну, призначений для розширення меж вимірювань струму магнітоелектричного приладу. Застосовувати шунти з іншими приладами недоцільно, оскільки ті споживають відносно велику потужність і шунти для них мали б великі габарити і значне споживання.

Шунти для порівняно невеликих струмів (кілька амперів) можна вмонтовувати усередині приладу. Це – внутрішні шунти. Для великих струмів застосовують зовнішні шунти (індивідуальні і взаємозамінні). Індивідуальні шунти, придатні лише для того вимірювального приладу, з яким вони градуювались, а взаємозамінні шунти можна застосовувати з будь-яким приладом, що має відповідні межі вимірювання напруги і номінальний струм.

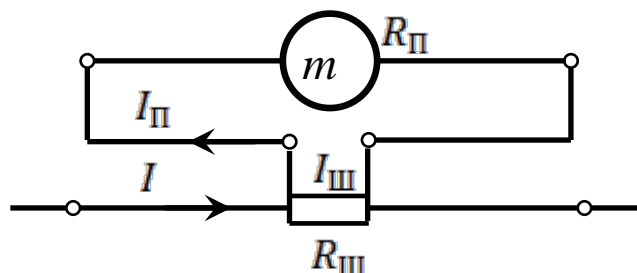


Рис. 7.1. Термоелектричний перетворювач

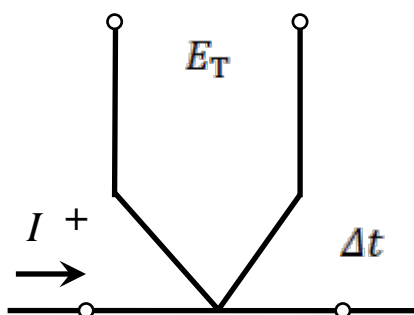


Рис. 7.2. Схема ввімкнення шунта

Усі шунти мають струмові, для ввімкнення в коло вимірюваного струму, і потенціальні (менших розмірів) затискачі для під'єднання вимірювального приладу (рис. 7.1, 7.2). Шунти для великих струмів під'єднують з допомогою спеціальних каліброваних проводів, що входять до комплекту вимірювального приладу.

Згідно з ГОСТ 8042–61 взаємозамінні шунти виготовляють для номінальних спадів напруги 60 або 75 мВ (як виняток дозволяється 100, 150 і

300 мВ), вони можуть мати клас точності від 0,02 до 0,5. Номінальні струми $I_{ном}$ таких шунтів мають значення від часток до тисяч амперів. Номінальний опір шунта (в омах) встановлюється залежно від номінального струму $I_{ном}$ (в амперах) і номінальної напруги $U_{ном}$ (в мілівольтах) із співвідношення, яке пояснюється, на рис. 7.2. Звідки:

$$U = I_{ш} R_{ш} = I_n R_n, \quad (7.1)$$

$$R_{ш} = 10^{-3} \frac{U_{ном}}{I_{ш} - I_{ном}} \quad (7.2)$$

де $I_{ном}$ – номінальний струм вимірювального приладу. Залежно від конструкції шунти виготовляють як стаціонарні, так і переносні. Стаціонарні шунти є звичайно однограничні, а переносні можуть бути також і багатограничними.

Додаткові резистори. Ці резистори застосовують для розширення меж вимірювань напруги вольтметрів магнітоелектричної, електродинамічної та електромагнітної систем і паралельних кіл електродинамічних ватметрів. Виготовляють додаткові резистори з манганінового дроту, намотаного на круглі або плоскі каркаси з ізоляційного матеріалу. Подібно до шунтів вони бувають одно- і багатограничні, внутрішні і зовнішні, індивідуальні і взаємо-замінні. Основні технічні параметри додаткових резисторів нормує ГОСТ 8623-69.

$$Q = I^2 R_H \tau \quad (7.3)$$

Термоелектричні перетворювачі. Термоелектричний перетворювач струму складається з нагрівного елемента, який є перетворювачем струму (його діючого значення) в тепло, і термопари – перетворювача температури нагріву елемента в термо- е. р. с. (рис. 7.2). При цьому кількість тепла, що виділяється в нагрівному елементі за час τ , а кількість тепла, що виділяється нагрівачем у навколишнє середовище (не враховуючи випромінювання):

$$Q_0 = cA\Delta t \tau \quad (7.4)$$

де R_H – опір нагрівного елемента; I – діюче значення струму; c – коефіцієнт тепловіддачі; A – площа поверхні охолодження нагрівного елемента; Δt – різниця температур нагрівника і навколишнього середовища.

При тепловій рівновазі $QH = Q_0$, звідки:

$$\Delta t = I^2 \frac{R_H}{cA} \quad (7.5)$$

При умові, що температури гарячого спаю термопари і нагрівного елемента, холодних кінців і навколишнього середовища відповідно

дорівнюють одна одній, дістанемо тобто термо-е.р.с. E_T термопарі прямо пропорційна квадрату діючого значення вхідного струму:

$$E_T = k\Delta t = I^2 \frac{kR_n}{cA} \quad (7.6)$$

Існують два основні різновиди термоперетворювачів – контактні і безконтактні. В контактних термоперетворювачах гарячий спай термопарі приварюється до нагрівача і має з ним електричний контакт.

У безконтактних термоперетворювачах термопара і нагрівний елемент з'єднані механічно з допомогою скляної чи керамічної краплі, електричний контакт між нагрівачем і термопарою відсутній. Для підвищення чутливості безконтактні термоперетворювачі виконують у вигляді термо-батареї. Недоліком безконтактних термоперетворювачів є їх порівняно велика інерційність.

Термоперетворювачі для малих струмів (одиниці, десятки міліамперів) виконують вакуумними. В таких термо-перетворювачах значно зменшується тепловідвід у навко-лишнє середовище, завдяки чому при інших рівних умовах підвищується температура нагрівника, а тим самим і чутливість термоперетворювача.

Термоелектричні перетворювачі застосовують як перетворювальні елементи в приладах для вимірювань малих змінних струмів в діапазоні частот від одиниць герців до сотень мегагерців. Недоліком термоелектричних перетворювачів (особливо контактних) є помітна залежність термо-е.р.с. від напрямку сталої складової струму (на постійному струмі – від напрямку струму) через нагрівний елемент, яка зумовлена як контактною різницею потенціалів у місці контакту гарячого спаю термопарі з нагрівним елементом, так і ефектом Пельтьє.

7.3. Модулятори та демодулятори

Якщо вимірювальний сигнал змінюється в часі за таким законом (має такий частотний спектр), при якому ускладнена його передача чи перетворення, то виникає необхідність модуляції, тобто утворення нового модульованого сигналу із заданим законом зміни (частотним спектром). Процес модуляції полягає в передачі інформації від вимірювального (модулюючого) сигналу до несучого. Несучим є деякий допоміжний сигнал, який має зручні для реалізації наступних операцій фізичну природу і закон зміни в часі. В ролі несучого найчастіше використовують синусоїдні або

імпульсні сигнали. При використанні гармонічного несучого сигналу можливі три види модуляції: амплітудна, частотна і фазова. При імпульсному несучому сигналі можна змінювати такі параметри: амплітуду, частоту, фазу або тривалість імпульсів. При цьому мають відповідно амплітудно-імпульсну, частотно-імпульсну, фазо-імпульсну та час-імпульсну модуляції.

Демодуляція – це перетворення промодульованого сигналу на сигнал, пропорційний вимірювальному (модулюючому).

У вимірювальній техніці найширше застосовують амплітудно-імпульсну модуляцію (демодуляцію) із схемною реалізацією на елементах ключового типу.

Залежно від способу ввімкнення ключового елемента (ключа) відносно наступного вимірювального перетворювача з вхідним опором R_H бувають модулятори послідовного, паралельного та послідовно-паралельного типів (рис. 7.3).

Вибір тієї чи іншої схеми здійснюється залежно від співвідношення опорів джерела сигналу R_C і R_H . При $R_H > R_C$ застосовують схему, подану на рис. 7.3, а, а при $R_H < R_C$ – на рис. 7.3, б. Якщо значення опорів R_H і R_C сумірні, то застосовують схему, подану на рис. 7.3, в.

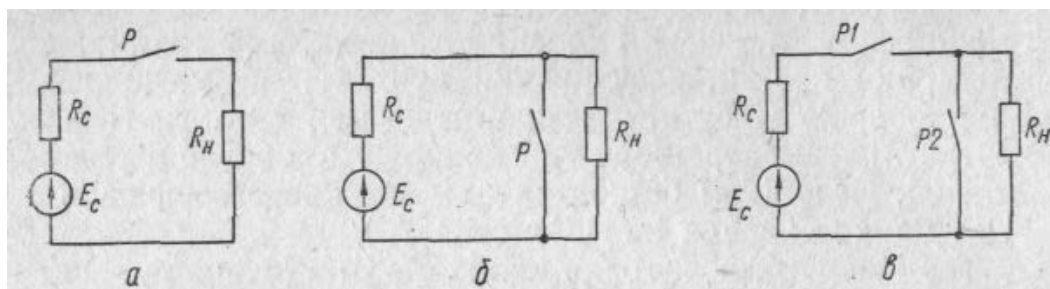


Рис. 7.3. Основні принципіальні схеми модуляторів

За інших рівних умов мінімальне значення похибки модуляції мають схеми з максимальним значенням перехідного опору R ключів у розімкненому стані і мінімальними значеннями перехідного опору r й залишкових (паразитних) напруг у замкненому стані.

Залежно від потрібних метрологічних характеристик при побудові модуляторів використовують ті чи інші ключові елементи. Практично застосовують електромеханічні (контактні) або безконтактні ключі. В останніх використовують біполярні і польові транзистори, діоди, оптоелектронні та ємнісні елементи.

Модулятори з електромеханічними ключами виконують з використанням віброперетворювачів або реле з магнітокерованими

контактами. Такі ключі за своїми характеристиками наближаються до ідеальних. У них $r < 0,1$ Ом, а $R > 1010$ Ом. Залишкові напруги і їх нестабільності, які зумовлені в основному електричними і електромагнітними наведеннями, а також контактними термо-е.р.с., не перевищують одиниць мікрвольтів на градус. Основним недоліком контактних модуляторів є порівняно малий їх строк служби.

Модулятори з транзисторними ключами не мають цього недоліку, зате мають більшу нестабільність залишкових напруг. Для зменшення впливу цих нестабільностей застосовують спеціальні схеми компенсації з використанням польових транзисторів і транзисторів у інтегральному виконанні. Ці заходи дають змогу зменшити значення нестабільності залишкових напруг до кількох мікрвольтів на градус.

Застосування в схемах модуляторів напівпровідникових діодів як ключових елементів дає змогу будувати порівняно нескладні діодні модулятори. Для зменшення похибок таких модуляторів їх ключі треба виконувати на кремнієвих діодах за компенсаційними схемами. При вдало підібраній парі діодів нестабільність залишкових напруг становить 15–20 мкВ/°С.

Модулятори на оптоелектронних елементах будують також за схемами, наведеними на рис. 7.4, у яких як ключі використовують фоторезистори. Істотною перевагою таких модуляторів порівняно з іншими безконтактними є відсутність гальванічних зв'язків між колами модулюючого і несучого сигналів. Нестабільність залишкових напруг модуляторів на оптоелектронних елементах становить десятки мікро-вольтів на градус.

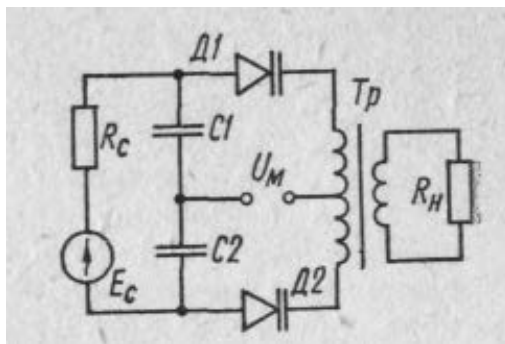


Рис. 7.4 Принципіальна схема модулятора на варикапах

Модулятори на ємнісних елементах побудовані на основі динамічного конденсатора. В цьому випадку модулююча напруга підводиться до обкладинок конденсатора, ємність якого змінюється періодично внаслідок коливань однієї з пластин під дією електро-магнітного поля котушки

збудження. Заряд конденсатора пропорційний модулюючому сигналу і залишається постійним, а напруга на ньому змінюється в такт із зміною ємності, тобто за законом зміни несучого сигналу. Високий поріг чутливості модуляторів з динамічним конденсатором (10–1015 А) досягають забезпеченням великого вхідного опору (10 Ом).

Крім розглянутих ключових модуляторів є модулятори, виконані на варикапах. Особливістю таких схем є те, що їх коефіцієнт перетворення є більшим від одиниці. Подібні модулятори відомі під назвою параметричних. При вдало підібраних варикапах вдається побудувати модулятор з порогом чутливості до десятків мікрвольтів.

Демодулятори – це пристрої перетворення попередньо промодульованого сигналу на сигнал, пропорційний модулюючому. Як і модулятори, демодулятори є амплітудні, частотні й фазові. Амплітудні демодулятори називають випрямлячами (випрямними перетворювачами) амплітудного значення. Випрямлячі застосовують для демодуляції і при дослідженні сигналів змінного струму.

Постійна складова вихідного сигналу випрямного · перетворювача може бути функцією як амплітудного, так і середнього або діючого значень вхідного сигналу. Відповідно існують випрямлячі середнього і діючого значень. Майже всі види випрямлячів побудовані із застосуванням нелінійних (випрямних) елементів, значення параметрів яких залежать від значення та знака вхідного сигналу. Як випрямні «лементи переважно використовують напівпровідникові діоди, що мають високу надійність і тривалий строк служби. Недоліком цих елементів є залежність їх параметрів від температури і частоти вхідного сигналу. В значній мірі цих недоліків позбавлені електроваку-умні діоди.

Випрямлячі середнього значення можна побудувати за одно- або двопівперіодною схемами. Найпростіша схема однопівперіодного випрямляча (рис. 7.5, а) має той істотний недолік, що вона придатна лише для випрямлення напруг, а при випрямленні струмів різка зміна опору діода при різних полярностях спричинюється до порушення режиму роботи кола. Вільною від цього недоліку є схема на рис. 7.5, б.

У вимірювальних випрямлячах середнього значення з однопівперіодним випрямленням стала складова вихідного сигналу за період синусоїдної вхідної напруги (рис. 7.5, в) при лінійній вольт-амперній характеристиці і відсутності зворотного струму діода, де U_m , $U_{ср}$ –

амплітудне і середньовипрямлене значення вхідної напруги; R_{np} – прямий опір діода.

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \frac{U_m \sin \omega t}{R_{np} + R_H} dt = \frac{1}{2} \frac{U_{cp}}{R_{np} + R_H} = S U_{cp} \quad (7.7)$$

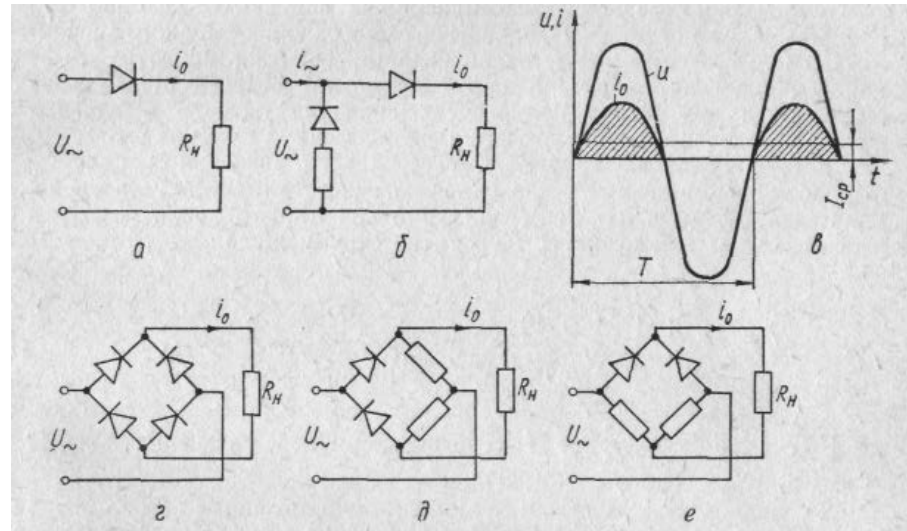


Рис. 7.5. Схеми напівпровідникових випрямних перетворювачів середнього значення

У випрямлячах з двопівперіодним випрямленням (рис. 7.5, г) вихідний струм на протязі кожного півперіоду зміни вхідної величини проходить у тому самому напрямку через R_H і, отже, за інших рівних умов чутливість таких випрямлячів у два рази вища, ніж у однопівперіодних. Їх недоліком є наявність чотирьох діодів. У зв'язку із значною залежністю параметрів діодів від температури таким перетворювачам властиві великі температурні похибки. Випрямлячі із заміщувачими опорами (рис. 7.5, д і е) мають нижчу чутливість, але їх температурні похибки менші.

Принцип роботи амплітудних випрямлячів (рис. 7.6) полягає в застосуванні методу «запам'ятовування» екстремальних значень вхідного сигналу. Запам'ятовуючим елементом у таких перетворювачах є конденсатор. У схемі з відкритим входом (рис. 7.6, а) при додатній півхвилі вхідної напруги конденсатор заряджається через діод до напруги $U_c \approx U_t$, а з моменту t_1 (рис. 7.6, б) розряджається через R_H доти, доки миттєве значення вхідного сигналу не стане дещо більшим від U_c і конденсатор знову підзарядиться до $U_c \approx U_m$. Якщо стала часу розряду $CR_H > T$ де T – період вхідної напруги U_x , то U_c буде практично незмінним і дорівнюватиме U_m .

Якщо вхідна напруга містить сталу складову, то вихідна напруга дорівнюватиме U_m (рис. 7.6, в).

У схемах із закритим входом (рис. 7.6, г) при наявності сталої складової вхідної напруги U_0 конденсатор C заряджатиметься до напруги $U_c = U_0 + U_m$, а спад напруги на опорі R_A буде $U_x - U_c = U_m \sin \omega t - U_m$, тобто незалежний від значення U_0 і містить змінну з амплітудою U_m і сталу $-U_m$ складові. Змінну складову можна відфільтрувати фільтром $R_\phi C_\phi$, а спад напруги на опорі R_H при $R_H > R_\phi$ дорівнюватиме U_m (рис. . 7.6, д).

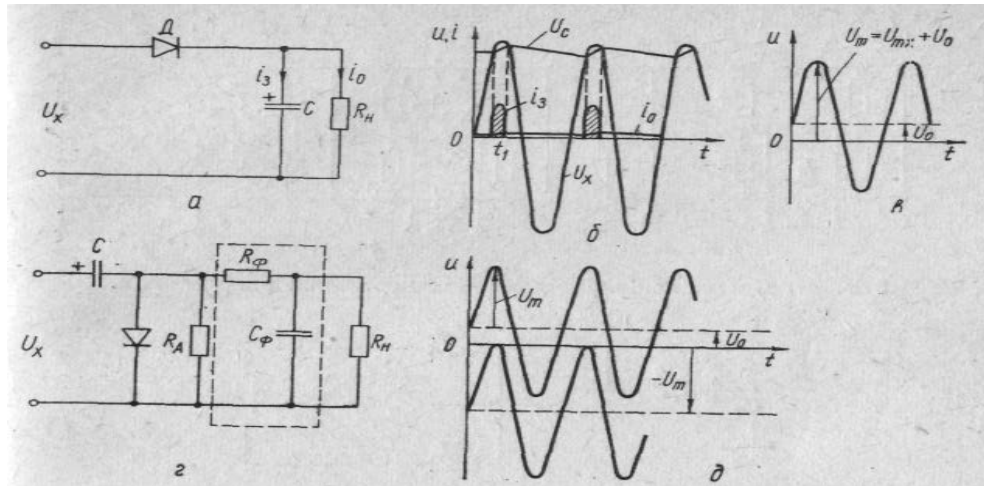


Рис. 7.6. Схеми діодних випрямлячів максимального значення і графіки струмів та напруги

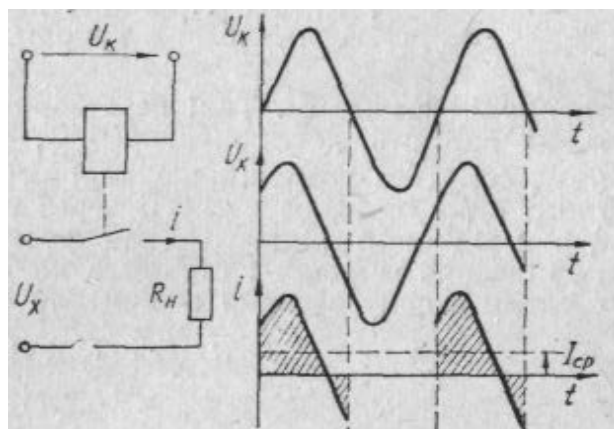


Рис. 7.7. Принципова схема і графіки випрямленого струму керованого випрямляча

В випрямлячах діючого значення використовують початкові ділянки вольт-амперних характеристик напівпровідникових діодів які близькі до квадратичних. Оскільки ці ділянки обмежені низькими напругами (до 1 В), то для залежності $i_0 = kU^2$ при більш високих напругах утворюють штучні кола з кількома відповідно з'єднаними діодами і додатковими та шунтуючими опорами.

Розглянуті схеми випрямлячів відомі під назвою некерованих, на відміну від керованих, у яких робота випрямного кола керується зовнішнім сигналом. Такі перетворювачі мають два входи: на один з них подають

досліджувану U_x , а на другий – керуючу напруги (рис. 40). При додатній півхвилі керуючої напруги ключ замикається (його опір дорівнює нулю) і через випрямне коло проходить струм, а при від'ємній півхвилі – він розмикається, тобто його опір буде нескінченно великий і струму в колі не буде. При умові, що вхідні сигнали є синусоїдними функціями часу однієї частоти, наприклад:

$$\begin{aligned} U_x &= U_{mX} (\sin \omega t + \varphi) \\ U_k &= U_{mX} \sin \omega t \end{aligned} \quad (7.8)$$

Середнє значення випрямленого струму буде:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \int_0^{T/2} \frac{1}{R_n} U_{mX} (\sin \omega t + \varphi) dt = \frac{1}{2R_n} U_{cp} \cos \varphi \quad (7.9)$$

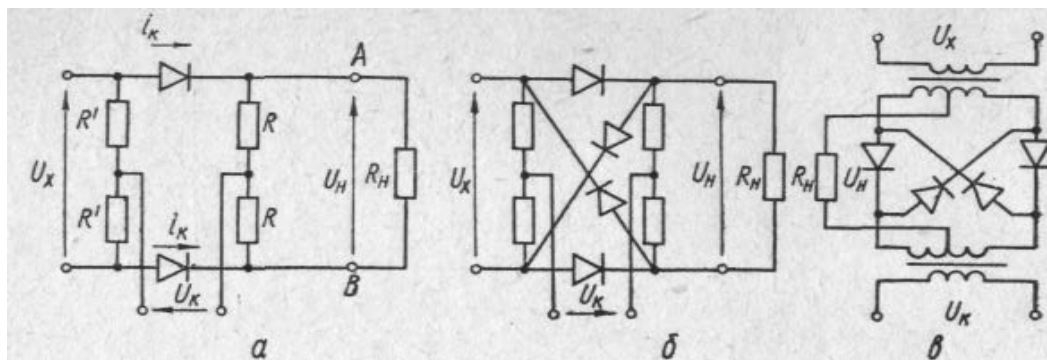


Рис. 7.8. Схеми напівпровідникових керованих випрямлячів

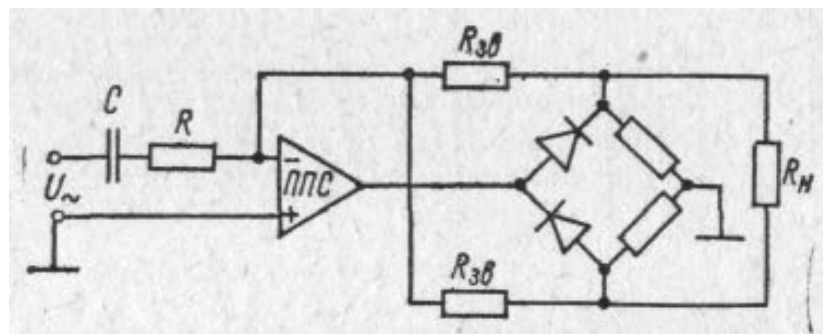


Рис. 7.9. Принципова схема активного випрямляча

Отже, значення вихідного сигналу залежатиме не лише від U_x , а й від кута зсуву фаз ψ між досліджуваною і керуючою напругами.

Практичне застосування мають два типи керованих випрямлячів: електромеханічний і напівпровідниковий.

Кола з електромеханічними керованими випрямлячами застосовують у векторметрах – приладах для вимірювання складових векторів напруги або струму. Наявність механічних рухомих контактів обмежує частотний діапазон (не більше 400 Гц) і довговічність. Цього недоліку не мають напівпровідникові фазочутливі випрямні кола.

Для пояснення принципу роботи найпростішого однопівперіодного фазочутливого випрямляча (рис. 7.8, *a*) припустимо спочатку, що прикладено лише напругу U_K . При додатній півхвилі цієї напруги діоди відкриваються, їх опори будуть малі і через них проходять струми i_k . При від'ємній півхвилі керуючої напруги U_K діоди закриваються, а їх опори стають великі. Якщо схема симетрична, то при будь-якому значенні і полярності керуючої напруги спади напруг на опорах R будуть однаковими, а напруга між точками A і B дорівнюватиме нулю – через опір РД струм не проходитиме.

Якщо прикладена напруга U_x значно менша від U_K , то можна вважати, що опір діодів залежить лише від значення і напрямку керуючої напруги і не залежить від напруги U_x , а середнє значення струму через R_H – від U_x і кута зсуву фаз між напругами u_k та i'_x .

Найбільше практичне застосування знайшли двопівперіодні фазочутливі випрямлячі (рис. 7.8, *б* і *в*), чутливість яких за інших рівних умов у два рази вища від чутливості однопівперіодних. Фазочутливі випрямлячі виконують як на електронних лампах, так і на транзисторах. Керування можна здійснювати зміною фази напруги на сітці (базі) відносно анода (колектора).

Фазочутливі напівпровідникові випрямлячі застосовують як нуль-індикатори в мостових і компенсаційних колах змінного струму.

Крім пасивних випрямлячів, описаних вище, існують активні (рис. 7.9), які мають у своєму складі підсилювачі постійного струму (ППС) і в яких введенням зворотних зв'язків значно зменшені похибки перетворення змінної напруги в сталу. Зокрема, якщо коефіцієнт підсилення ППС дорівнює S , то вплив нестабільності параметрів діодів зменшується майже в S разів.

7.4. Подільники напруги

Резистивні подільники. Схему найпростішого (однограничного) резистивного подільника напруги подано на рис. 7.10. Коефіцієнт ділення, визначений при умові, що подільник навантажений на нескінченно великий опір, дорівнює:

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (7.10)$$

Резистивні подільники напруги застосовують для розширення меж вимірювань електровимірювальних приладів з високим вхідним опором (електронних і цифрових вольтметрів, компенсаторів постійного струму).

Вони бувають звичайно багатограничними і виконуються за схемою із сталим вхідним або вихідним опором (рис. 7.11). Основні технічні характеристики резистивних подільників напруги постійного струму нормує ГОСТ 11282-75, згідно з яким клас точності таких подільників може досягати 0,0001; максимальна робоча напруга – 1000 В; максимальний коефіцієнт ділення – 1000; частотний діапазон не перевищує 10 кГц; застосовують – в основному на постійному струмі. Для зменшення частотних похибок при їх використанні на змінному струмі застосовують частотну компенсацію.

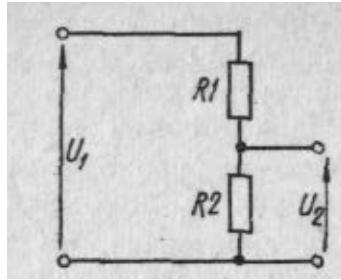


Рис. 7.10. Схема однограничного резистивного подільника напруги

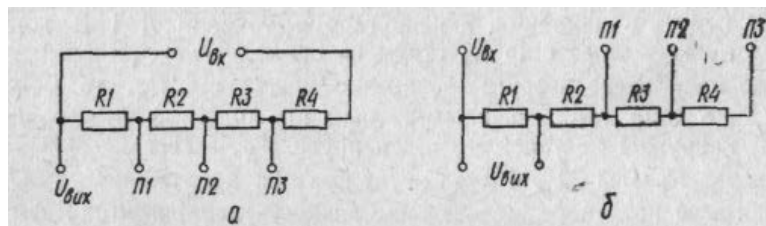


Рис. 7.11. Схеми багатограничних резистивних подільників напруги

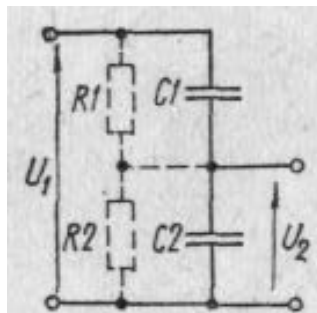


Рис. 7.12. Схема ємнісного подільника напруги

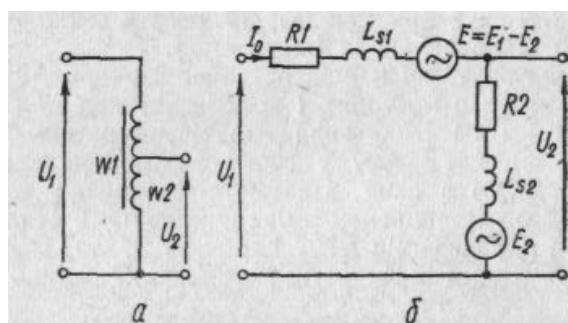


Рис. 7.13. Принципіальна та еквівалентна схеми заміщення індуктивного подільника напруги

Ємнісні подільники. Схема найпростішого ємнісного подільника подана на рис. 7.12. Коефіцієнт ділення такого подільника описується рівнянням:

$$n = \frac{C_1 \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_1} \right) + C_2 \left(1 + \frac{1}{j\omega C_2 R_2} \right)}{C_1 \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_1} \right)} \quad (7.11)$$

де R_1, R_2 – опори ізоляції відповідних конденсаторів.

У загальному випадку n залежить від частоти. Проте на досить високих частотах ($1/\omega_1 C_1 R_1 ; 1 + 1/\omega C_2 R_2$) і дуже низьких ($\omega \rightarrow 0$, тобто $1/\omega C_1 R_1 ; 1 + 1/\omega C_2 R_2 \gg 1$) коефіцієнт ділення (відповідно $n = (C_1 + C_2)/C_1$ і $\eta = s = (R_1 + R_2/R_2)$) від частоти не залежить. Для ємнісних подільників, призначених для роботи в широкому діапазоні частот, конденсатори шунтують опорами так, щоб виконувалась умова $R_1'/R_2' = C_2/C_1$, де R_1' та R_2' є сумарні еквівалентні опори, що шунтують відповідно C_1 і C_2 . Застосовують ємнісні подільники головним чином для розширення меж вимірювань електростатичних вольтметрів на змінному струмі. 1

Прийmemo $R_i = R + \Delta R_i$; $L_{Si} = L_S + L_{Si}$.

де:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p R_i; \\ L_S &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p L_{Si}. \end{aligned} \quad (7.12)$$

Враховуючи, що:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^p \Delta R_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^p \Delta L_{Si} &= 0. \end{aligned} \quad (7.13)$$

отримаємо:

$$\begin{aligned} R_1 &= \sum_{i=q+1}^p (R + \Delta R_i) = (p - q)R + \sum_{i=q+1}^p \Delta R_i; \\ R_2 &= qR + \sum_{i=1}^q \Delta R_i. \end{aligned} \quad (7.14)$$

$$L_{S1} = (p - q)\Delta L_S = \sum_{i=1+q}^p \Delta L_{Si}; \quad (7.15)$$

$$L_{S2} = qL_S + \sum_{i=1}^q qL_{Si}.$$

Дійсний коефіцієнт ділення індуктивного подільника напруги в режимі холостого ходу буде:

$$\begin{aligned} \dot{n} &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{E}_1 + \dot{I}_0(R_1 + j\omega L_{S1} + R_2 + j\omega L_{S2})}{\dot{E}_2 + \dot{I}_0(R_2 + j\omega L_{S2})} \cong \\ &\cong n_{ном} \left\{ 1 + \frac{\dot{Z}_m}{n_{ном} j\omega p^2} \left[\left(\sum_{i=q+1}^p \Delta R_i - \frac{p-q}{q} \Delta R_i \right) + j\omega \left(\sum_{i=1+q}^p \Delta L_{Si} - \frac{p-q}{q} \Delta L_{Si} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (7.16)$$

Звідки виходить, що:

$$I_0 \sum_{i=q+1}^p \Delta R_i \ll \dot{E}; \quad I_0 \sum_{i=q+1}^p \Delta L_{Si} \ll \dot{E}; \quad \dot{E}_1 = -\frac{j\omega p^2}{\dot{Z}_m} \dot{I}_0. \quad (7.17)$$

Індуктивні подільники. Конструктивно індуктивний подільник напруги нагадує автотрансформатор. На тороїдному феромагнітному осерді намотана обмотка з числом витків w_1 до якої підведена вхідна напруга U_1 . Вихідна напруга U_2 знімається з частини обмотки, число витків якої дорівнює w_2 . Обмотка намотується джгутом із скручених ізольованих проводів, число яких дорівнює числу необхідних секцій так, щоб вона була рівномірно розподілена по периферії тороїда. Кінець однієї секції з'єднують з проводом наступної і т. д. Від місць з'єднань роблять виводи до затискачів вихідного кола.

На рис. 7.13 наведено принципіальну і еквівалентну схеми заміщення (без урахування міжвиткових паразитних ємностей) найпростішого індуктивного подільника напруги з номінальним коефіцієнтом ділення.

$$n_{ном} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (7.18)$$

Після введення відповідних позначень:

$I_0 = \Phi_0 / \dot{Z}_M$ – намагнічуючий струм, Φ_0 – струм основний потік намагнічення \dot{Z}_M – комплексний магнітний опір осердя); E_1, E_2 – е.р.с., наведені у відповідних обмотках основним потоком.

$$\begin{aligned} R_1 &= \sum_{i=q+1}^p R_i; \quad R_2 = \sum_{i=1}^p R_i; \\ L_{S1} &= \sum_{i=q+1}^p L_{Si}; \quad L_{S2} = \sum_{i=1}^p L_{Si}; \end{aligned} \quad (7.19)$$

де p і q – числа витків відповідно у вхідній і вихідній обмотках; R_i – активний опір i -го витка; L_{Si} – індуктивність розсіювання i -го витка.

Отже, похибки такого подільника в режимі холостого ходу не залежать від активних опорів і індуктивностей розсіювання обмоток, а визначаються лише відмінностями (розкидами) їх значень.

Спад напруги на активних опорах і індуктивностях розсіювання обмоток малий порівняно з е.р.с., що наводиться в них, тому вплив невеликих

розходжень у їх значеннях на похибку коефіцієнта ділення буде незначним. За інших рівних умов похибка подільника залежить від комплексного магнітного опору осердя і тим менша, чим менший магнітний опір, тобто чим вища магнітна проникність осердя.

Застосовують ці подільники на частотах звукового діапазону, вони є перспективними перетворювачами напруги для різних електричних вимірювальних кіл і пристроїв. Похибки таких подільників при серійному виробництві можна звести до 0,001 % і менше. В найкращих зразках точність коефіцієнта ділення оцінюється похибкою порядку $10^{-5}\%$ при фазовій похибці, що не перевищує 10^{-6} рад.

7.5. Вимірювальні трансформатори

Загальні відомості. Вимірювальними називаються трансформатори, які призначені для перетворення (трансформації) струму чи напруги з певною точністю. Вимірювальні трансформатори призначені для розширення меж вимірювань струму і напруги відповідних засобів вимірювань.

А для трансформатора напруги:

$$K_{U_{ном}} = \frac{U_{ном1}}{U_{ном2}} \quad (7.20)$$

За принципом дії вимірювальні трансформатори подібні до силових. На феромагнітному осерді намотані ізолювано одна від одної первинна w_1 і вторинна w_2 обмотки. Співвідношення між числами витків w_1 і w_2 залежать від значення номінального коефіцієнта трансформації, який для трансформатора струму визначають як:

$$K_{I_{ном}} = \frac{I_{ном1}}{I_{ном2}} \quad (7.21)$$

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1 = \dot{\Phi} \dot{Z}_M \quad (7.22)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j\omega w_1 \dot{\Phi} = \dot{I}_1 \dot{Z}_1; \\ \dot{E}_2 &= -j\omega w_2 \dot{\Phi} = \dot{I}_1 (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_H). \end{aligned} \quad (7.23)$$

де $I_{ном1}$, $I_{ном2}$, $U_{ном1}$, $U_{ном2}$ – відповідно номінальні значення первинного і вторинного струмів та первинної і вторинної напруг.

Дійсні коефіцієнти трансформації відрізняються від номінальних, причому їх значення не є сталими і залежать від режиму роботи трансформатора, значення і характеру опору навантаження, частоти струму:

$$K_I = \frac{I_1}{I_2}, \quad K_U = \frac{U_1}{U_2}, \quad (7.24)$$

Отже, при визначенні первинних величин за номінальними коефіцієнтами трансформації виникають похибки струму і напруги (в відсотках):

$$f_i = \frac{K_{ном} I_2 - K_i I_2}{K_i I_2} \cdot 100 = \frac{K_{ном} - K_i}{K_i} \cdot 100;$$

$$f_U = \frac{K_{Уном} I_2 - K_U I_2}{K_U I_2} \cdot 100 = \frac{K_{Уном} - K_U}{K_U} \cdot 100. \quad (7.25)$$

У загальному випадку в реальних трансформаторах, на відміну від ідеальних, вектор вторинного струму (напруги) повертається відносно первинного не точно на 180° , що є причиною кутової похибки трансформації струму δi чи напруги δu .

Кутові похибки визначаються кутом між вектором первинної величини і поверненим на 180° вектором вторинної величини. Кутова похибка вважається додатною, якщо вектор первинної величини відстає від поверненого на 180° вектора вторинної величини.

У зв'язку з наявністю похибок струму чи напруги і відповідних кутових похибок є поняття комплексних коефіцієнтів трансформації струму і напруги:

$$\dot{K}_I = \frac{\dot{I}_1}{-\dot{I}_2} = \frac{I_1}{-I_2} e^{-j\delta I} = K_I e^{-j\delta I};$$

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_1}{-\dot{U}_2} = \frac{U_1}{-U_2} e^{-j\delta U} = K_U e^{-j\delta U}. \quad (7.26)$$

де δ_I, δ_U – кутові похибки, виражені в радіанах.

Значення кутових похибок вимірювальних трансформаторів нормують звичайно в мінутах.

Вимірювальні трансформатори струму. Трансформатор струму працює в режимі, близькому до короткого замикання, бо в його вторинне коло вмикають амперметри, послідовні обмотки ватметрів, лічильників електричної енергії та фазометрів, опір яких малий.

Електричні й магнітні величини: I_1, I_2, I_0 – первинний, вторинний та намагнічуючий струми; Φ – основний магнітний потік; Z_M – комплексний магнітний опір осердя; Z_1 і Z_2 – комплексні опори первинної і вторинної обмоток, зумовлені активними опорами обмоток і індуктивностями розсіяння; Z_h – опір навантаження.

На основі цих співвідношень можна побудувати векторну діаграму (рис. 7.14) і записати основне рівняння вимірювального трансформатора струму:

$$i_2 w_2 - \dot{\Phi} \dot{Z}_M = -i_1 w_1 \quad (7.27)$$

Оскільки:

$$i_2 \dot{Z} = i_2 (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_H) = -j\omega w_2 \dot{\Phi} \quad (7.28)$$

Звідки рівняння трансформатора матиме вигляд:

$$\dot{\Phi} = -\frac{i_2 \dot{Z}}{j\omega w_2}, \quad i_2 w_2 + \frac{i_2 \dot{Z} \dot{Z}_M}{j\omega w_2} = -i_1 w_1 \quad (7.29)$$

звідки комплексний коефіцієнт трансформації:

$$\dot{K}_I = \frac{i_1}{-i_2} = \frac{w_2}{w_1} \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Z}_M}{j\omega w_2^2} \right) \quad (7.30)$$

а комплексна похибка трансформатора струму:

$$\dot{\lambda}_I = f_I + j\delta_I = \frac{K_{\text{ном}} - \dot{K}_I}{\dot{K}_I} \cong \frac{\dot{Z} \dot{Z}_M}{j\omega w_2^2} \quad (7.31)$$

Із приведеного виразу видно, що значення похибок f_I та δ_I прямо пропорційно залежать за інших рівних умов від магнітного опору осердя ζ_μ і опору вторинного кола (в тому числі і від Z_H).

Залежно від призначення вимірювальні трансформатори струму поділяються на стаціонарні і лабораторні. Переносні лабораторні трансформатори струму здебільшого багатограничні. Для розширення меж вимірювань часто в корпусах переносних трансформаторів струму з тороїдними осердями передбачається отвір, через який можна намотати зовнішню первинну обмотку проводом відповідного діаметра. Число витків w -і такої обмотки має бути таким, щоб добуток $I_1 W_1$ по можливості дорівнював номінальному числу ампер-витків трансформатора, які лежать у межах 600-2000 і зазначені на щитку трансформатора.

Основні технічні характеристики лабораторних і стаціонарних вимірювальних трансформаторів струму нормують ГОСТ 9032-69 і ГОСТ 7746-68: номінальні значення первинних (від 0,1 до 40000 А) та вторинних (звичайно 5 А, рідше 1, 2 або 2,5 А) струмів; класи точності (для лабораторних – від 0,01 до 0,2); номінальні вторинні навантаження Z_H , тобто найбільші значення опорів вторинного кола, при яких похибки не перевищують допустимих для даного трансформатора значень (лабораторні трансформатори з $I_{\text{ном}2} = 5$ А мають Z_H від 0,2 до 0,6 Ом при $\cos \varphi = 0,8 - 1,0$ на частоті струму 50 Гц).

Вимірювальні трансформатори напруги. Режим роботи вимірювального трансформатора напруги наближається до режиму холостого ходу. Умови для такого режиму забезпечуються тим, що до вторинної

обмотки трансформатора напруги під'єднують прилади з порівняно великим опором (вольтметри, паралельні кола ватметрів тощо).

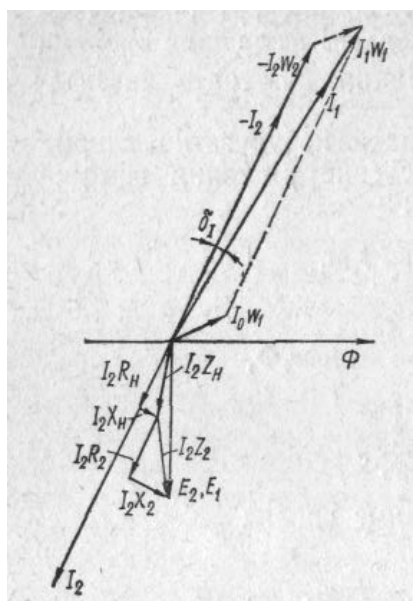


Рис. 7.14. Векторна діаграма вимірювального трансформатора струму

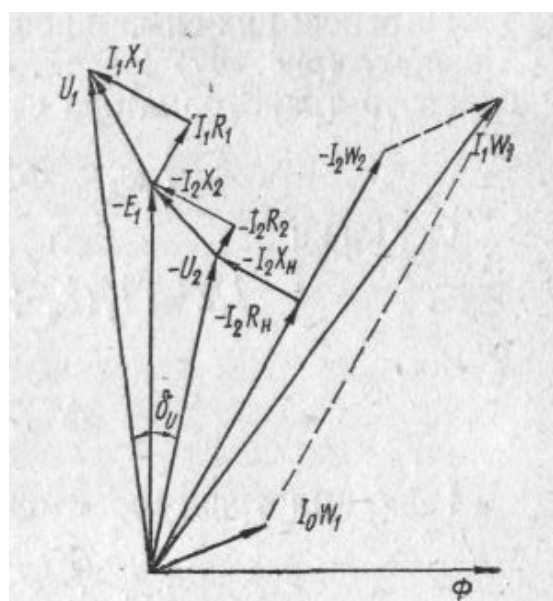


Рис. 7.15. – Векторна діаграма вимірювального трансформатора напруги

На основі наведених вище співвідношень між електричними і магнітними величинами в трансформаторі можна побудувати векторну діаграму трансформатора напруги (рис. 7.15) і подати комплексний коефіцієнт трансформації K_U через електричні і магнітні параметри:

$$\begin{aligned} \dot{K}_U &= \frac{\dot{U}_1}{-\dot{U}_2} = \frac{\dot{I}_1 \dot{Z}_1 - \dot{E}_1}{-\dot{I}_2 \dot{Z}_H} = K_U \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_H} + \dot{I}_2 \dot{Z} \frac{w_1}{w_2} = \frac{w_1}{w_2} \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Z}_M}{j\omega w_2^2} \right) \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_H} + \frac{w_1}{w_2} \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_H} = \\ &= \frac{w_1}{w_2} \left[1 + \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_H} + \frac{w_2^2}{w_1^2} \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_H} \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Z}_M}{j\omega w_2^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (7.32)$$

Вираз для комплексної похибки трансформатора напруги матиме вигляд:

$$\lambda_U = f_U + j\delta_U = \frac{K_{Uном} - \dot{K}_U}{\dot{K}_U} \cong - \left[\frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_H} + \frac{w_2^2}{w_1^2} \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_H} \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Z}_M}{j\omega w_2^2} \right) \right] \quad (7.33)$$

З векторної діаграми і виразу для λ_U видно, що похибки f_U та δ_U дорівнюють нулю при $Z_1 = 0$ і $Z_2 = 0$.

Значення похибок трансформатора напруги також залежать від значення і характеру опору навантаження вторинного кола; похибки тим менші, чим менше навантаження (більший Z_H).

Згідно ГОСТ 9032–69 і ГОСТ 1983–67 лабораторні вимірювальні трансформатори напруги є класів точності 0,05; 0,1 і 0,2. Номінальні

первинні напруги трансформаторів напруги дорівнюють 100,127,150 і до 35000В, а вторинні – 100/3; 100/√3; 100 і 150 В. Допустимі значення вторинних навантажень нормують у вигляді номінальної потужності, яка може дорівнювати 5, 10, 15 або 25 В · А, $\cos \varphi_n = 0,8 - 1,0$.

Вимірювальні трансформатори постійного струму. Для вимірювань великих постійних струмів, коли застосувати шунти неможливо (наприклад, в колах високої напруги) або нераціонально, для розширення меж вимірювань у амперметрах застосовують вимірювальні трансформатори постійного струму. Принципову схему такого перетворювача струму подано на рис. 7.16,а. На два ідентичні осердя із феромагнітного матеріалу з великою магнітною проникністю і порівняно невеликою індукцією насичення (наприклад, пермалоеві) намотані первинні та вторинні обмотки, числа витків яких відповідно дорівнюють W_1 і W_2 . Через первинні обмотки, які намотані на обох осердях в однакових напрямках і з'єднані послідовно, пропускають вимірюваний постійний струм. Вторинні обмотки, з'єднані також послідовно, але намотані в протилежних напрямках, під'єднують до джерела змінної напруги.

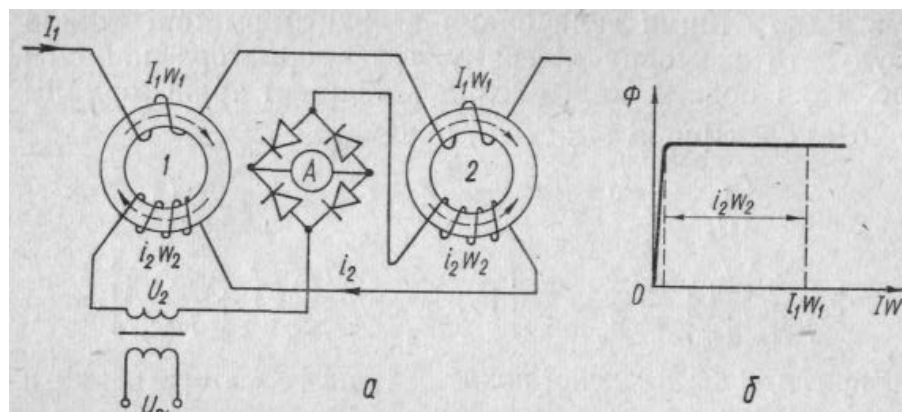


Рис. 7.16. Принципова схема вимірювального трансформатора постійного струму

Завдяки такому виконанню й з'єднанню первинних і вторинних обмоток намагнічуючі сили i_2W_2 та I_1W_1 протягом одного півперіоду напруги U_{\sim} матимуть в одному з осердь однакові напрямки і додаватимуться, в іншому осерді – протилежні напрямки і відніматимуться. У наступний півперіод осердя ніби поміняються ролями.

$$I_{сер} = I_1 \frac{w_1}{w_2} \quad (7.34)$$

Якщо форма кривої намагнічування осердя близька до прямокутної (рис. 7.16), опір обмоток w_2 дорівнює нулю, а напруга U_{\sim} досить велика, то

форма кривої струму i_2 дуже близька до прямокутної і середнє значення цього струму практично не залежить від напруги U_{\sim} і частоти. Якщо в коло струму i_2 ввімкнути випрямний прилад, покази якого пропорційні середньому значенню.

Отже, середнє значення вторинного струму пропорційне первинному (вимірюваному), а співвідношення між цими струмами, як і в трансформаторах змінного струму, виражаються через відношення чисел витків.

7.6. Вимірювальні підсилювачі

Вимірювальні підсилювачі входять до складу багатьох сучасних засобів вимірювань, їх застосування, дає змогу підвищити чутливість останніх на декілька порядків й істотно зменшити споживання енергії від досліджуваного об'єкта (в окремих випадках підвищується і точність вимірювань).

Залежно від типу підсилювальних елементів розрізняють електронно-лампові, напівпровідникові і гальванометричні вимірювальні підсилювачі.

До недавнього часу електронно-лампові підсилювачі здебільшого застосовували в засобах вимірювання для забезпечення великого вхідного опору (10^{10} – 10^{13} Ом).

Застосування у вхідних каскадах підсилювачів польових транзисторів дає змогу одержати ті самі значення вхідного опору при значно менших габаритах і вищій надійності. В зв'язку з цим електронно-лампові підсилювачі застосовуються обмежено.

Застосування інтегральних схем не тільки зменшує габарити засобів вимірювань, а й значно підвищує їх надійність (зменшується кількість монтажних з'єднань).

Для підсилення сигналів постійного струму дуже низького рівня застосовують гальванометричні підсилювачі. Гальванометричні підсилювачі – це поєднання високочутливого магнітоелектричного гальванометра і перетворювача малих відхилень рухомої частини гальванометра в струм, який значно більший за своїм значенням від вхідного.

Найпоширенішими з гальванометричних підсилювачів є фотогальванометричні. В цих підсилювачах маленьке дзеркало, що закріплене на рухомій рамці гальванометра (рис. 7.17), відбиває промінь світла від лампочки Л на фоторезистори Φ_1 та Φ_2 , які разом з резисторами R_1 і R_2 утворюють мостову

схему. У випадку відсутності вхідного сигналу ($I_{вх} = 0$) фоторезистори освітлені однаково, мостова схема зрівноважена і струм у навантаженні R_H відсутній. При проходженні струму через рамку гальванометра остання повертається, повертаючи на певний кут дзеркало. При цьому освітленість фоторезисторів змінюється, баланс моста порушується і по навантаженні проходить струм. Поріг чутливості такого підсилювача визначається чутливістю гальванометра і становить близько 10^{-8} А. Найпоширеніший фотогальванометричний підсилювач Ф 17 має коефіцієнт підсилення струму близько $5 \cdot 10^4$ при вхідному опорі 60 Ом і нестабільності вихідного струму $5 \cdot 10^{-9}$ А. Недоліками гальванометричних підсилювачів є їх велике власне споживання і габарити, низька механічна міцність.

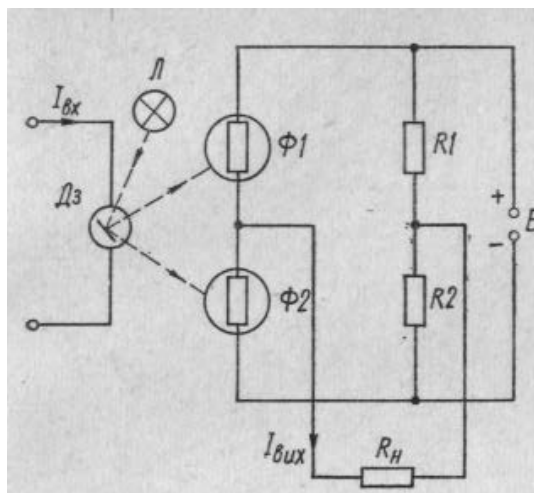


Рис. 7.17. Принципова схема фотогальванометричного підсилювача

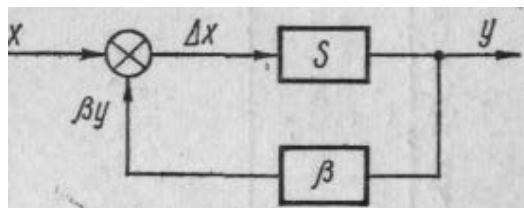


Рис. 7.18. Структурна схема підсилювача, охопленого від'ємним зворотним зв'язком

Основною статичною характеристикою вимірювального підсилювача є коефіцієнт перетворення (відношення вихідної величини Y до вхідної X). Для ідеального лінійного підсилювача $K(X) = S = \text{const}$, де S – коефіцієнт перетворення (підсилення). Зв'язок між X і Y в реальному підсилювачі можна подати у вигляді:

$$Y = Y_0 + (S + \Delta S)X \quad (7.35)$$

Величини Y_0 та ΔS характеризують відхилення реальної функції перетворення від ідеальної і вказують на міру недосконалості підсилювача.

Величина Y_0 зумовлюється, в основному, шумами елементів схеми підсилювача, електромагнітними і гальванічними наведеннями, зміною напруги джерела живлення й температури навколишнього середовища, а величина ΔS – нестабільністю значень параметрів елементів схеми.

Основними критеріями якості вимірювального підсилювача є зведений до входу рівень перешкод:

$$\Delta x_0 = \frac{Y_0}{S} \quad (7.36)$$

і відносна нестабільність чутливості:

$$\delta_s = \frac{\Delta S}{S} \quad (7.37)$$

Для зменшення рівня перешкод застосовують електромагнітне екранування, стабілізацію напруг джерела живлення, певні схемні й структурні методи.

Ефективним способом зменшення відносної нестабільності є застосування від'ємних зворотних зв'язків. Для підсилювача, охопленого таким зв'язком (рис. 7.18), коефіцієнт перетворення буде:

$$S' = \frac{Y}{X} = \frac{S}{1 + \beta S} \quad (7.38)$$

а відносна нестабільність:

$$\delta_s' = \frac{1}{1 + \beta S} \delta_s \quad (7.39)$$

Крім зменшення відносної нестабільності від'ємний зворотний зв'язок дає змогу змінювати значення вхідного R_0 та вихідного $R_{вих}$ опорів підсилювача (табл. 10) і розширити частотний діапазон вимірюваних сигналів.

Залежно від частотного діапазону підсилювальних сигналів вимірювальні підсилювачі можна поділити на постійного ППС і змінного струмів та вибірні. Кожному виду підсилювачів відповідає певний вигляд амплітудно-частотної характеристики як залежності коефіцієнта перетворення S від частоти вхідного сигналу (рис. 7.19). Назва підсилювача постійного струму дещо умовна, бо він призначений для підсилення сигналів не лише постійного, а й змінного струмів.

Значним недоліком ППС є велике значення зведеного до входу рівня перешкод ΔX_n , який у даному випадку називається *зведеним дрейфом* (нестабільністю) вихідної напруги. Підвищене значення дрейфу у ППС пояснюється тим, що в перешкоді ΔX_0 найвищу енергію мають складові з інфранизькими частотами.

Найменший дрейф мають ППС, які побудовані за МДМ структурою (рис. 7.20). Основними вузлами таких підсилювачів є модулятор M , підсилювач змінного струму (ПЗС) і демодулятор ДМ.

Вхідний сигнал з допомогою модулятора перетворюється в амплітудно-модульований, підсилюється малочутливим до низькочастотних перешкод ПЗС і демодулюється з допомогою ДМ (керованого випрямляча). Такі ППС мають дрейф вихідної напруги близько сотні нановольтів на градус.

Підсилювачі постійного струму найчастіше застосовують як операційні, тобто такі, які разом з елементами зовнішнього від'ємного зворотного зв'язку виконують математичні операції додавання, множення на сталий коефіцієнт, інтегрування, диференціювання і т. д.

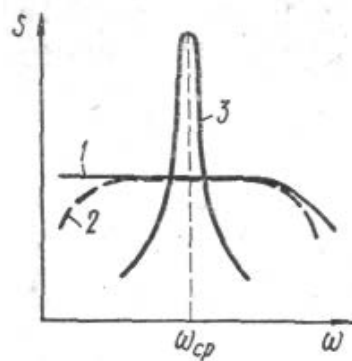


Рис. 7.19. Амплітудно-частотні характеристики вимірювальних підсилювачів

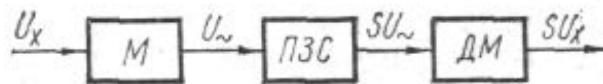


Рис. 7.20. Структурна схема вимірювального підсилювача з МДМ структурою

Запитання для самоконтролю до теми 7

1. Що таке перетворювачі роду вимірюваної величини? Навести приклади.
2. Дати характеристику модуляторам та демодуляторам. В чому їх відмінність?
3. Що таке подільники напруги? Їх характеристики.
4. Види вимірювальних трансформаторів. Їх характеристики.
5. Що таке вимірювальні підсилювачі? Їх характеристики.

Тема 8. Електричні вимірювальні прилади та вимірювання

План

8.1. Загальні відомості

8.2 Електромеханічні вимірювальні перетворювачі струму та напруги

8.1. Загальні відомості

Загальні принципи роботи вимірювальних перетворювачів. У точному значенні слова «вимірювальний перетворювач» є приладом, який перетворює зміну однієї величини в зміну інший. В термінах електроніки вимірювальний перетворювач визначається як прилад, що перетворює неелектричну фізичну величину (звану вимірюваною фізичною величиною) в електричний сигнал, або навпаки. Є, звичайно, і виключення з цього правила.

Звідси витікає, що вимірювальні перетворювачі використовуються в електронних системах, тобто, в технічних пристроях з електричним сигналом, що відображує результат вимірів або спостережень.

З іншого боку, вимірювальний перетворювач може бути використаний на виході системи, щоб, скажімо, генерувати механічний рух залежно від електричного сигналу, що керує. Прикладом реалізації перетворювачів є система, в якій мікрофон (вхідний перетворювач) перетворює звук (вимірювану фізичну величину) на електричний сигнал. Останній посилюється, а потім поступає на гучномовець (вихідний перетворювач), відтворюючий звук істотно гучніший, ніж той, який сприймається мікрофоном.

Часто вимірювана величина згідно з її визначенням просто вимірюється електронною системою, а отриманий результат тільки відображується або запам'ятовується. Проте в деяких випадках виміри утворюють вхідний сигнал схеми, що управляє, яка служить для регулювання вимірюваної величини або відносно деякого заздалегідь встановленого рівня, або для управління змінною величиною відповідно до вимірюваної. Незважаючи на очевидне часткове дублювання вимірювальних перетворювачів в цих двох прикладах, прийнято розрізняти ці області використання перетворювачів, називаючи їх відповідно контрольно-вимірювальне устаткування і таке, що управляє.

У свою чергу, ці дві області підрозділяються на телеметричне контрольно-вимірювальне устаткування (у якому вимірювальні системи

використовуються спільно з радіолініями, зв'язки між перетворювачем і пристроями відображення інформації), хімічний аналіз (при якому система використовується для того, щоб визначити і відобразити відносний зміст тих, що становлять суміш речовин), процес керування (у якому виробничий процес, наприклад, прокат стали, контролюється і керується) тощо.

Розглядаючи структурні схеми контрольно-вимірювальною і керуючої систем нагадаємо, що:

Вимірювана величина - це фізична величина, що підлягає виміру, наприклад: прискорення, переміщення, сила, витрата, рівень, положення, тиск, механічна напруга, температура, швидкість і тому подібне. В деяких випадках вимірюваною може бути і електрична величина, така, як струм, напруга або частота, яка перетвориться в електричний сигнал, придатний для використання в інших частинах системи. При цьому вимірювальний перетворювач є електричним перетворюючим елементом.

Вхідний перетворювач, що перетворює вимірювану величину в електричний сигнал, - це прилад, придатний для використання в інших частинах системи. Правда, хоча вхідні перетворювачі генерують електричний вихід, існують, проте, серед них і такі, які мають іншу природу вихідного сигналу, наприклад тиск повітря, але таких перетворювачів небагато. Перетворювачі з неелектричним виходом застосовуються як чутливі елементи вимірювальних перетворювачів або служать для перетворення неелектричного сигналу на електричний. Усі функції перетворювачів є аналоговими, тому в загальному випадку (за деякими виключеннями) їх сигнали також аналогові.

Лінії зв'язку - це лінії між вхідним перетворювачем і іншою частиною системи. Таких ліній в строгому сенсі може іноді і не бути, якщо, скажімо, вхідний перетворювач розміщується в декількох сантиметрах від іншої частини системи. Якщо ж він розташовується на іншій відстані від системи, то мають бути зроблені кроки до того, щоб лінії зв'язку не впливали або слабо впливали на ефективність роботи системи.

Там, де в системі є істотні лінії зв'язку, вимагається один або більш за каскади сполучення сигналів, щоб малий вихідний сигнал вхідного перетворювача посилити, піддати аналого-цифровому перетворенню, фільтрації, модуляції і тому подібне. Це необхідно для того, щоб інформація, що видається первинним перетворювачем, не втрачалася при передачі її до інших частин системи. Такі каскади можуть включати і схеми обробки

сигналу, в яких що містяться в сигналі вхідного перетворювача дані піддаються цифровій обробці, а результуючий сигнал або результати обчислень можуть бути відображений на дисплеї, запам'ятали або використані в цілях управління. Сполучення сигналів може здійснюватися в декількох точках системи.

В деяких випадках досить складно зробити ув'язнення про те, де в системі аналогові сигнали перетворювачів стають даними. Тому часто неможливо розрізнити каскади формування аналогового сигналу і обробки даних. Ця відмінність є досить значною.

Прилади, що відображують або запам'ятовують, - це прилади, які відображають поточне значення вимірюваної величини для зручності роботи оператора системи або запам'ятовують відповідну інформацію для її наступного використання.

У разі системи, що керує, застосовуються деякі види компаруючих приладів, призначених для порівняння оброблюваних даних з деякими опорними значеннями і отримання різницевого сигналу.

Вихідний перетворювач, що працює по різницевому сигналу, використовується для управління вимірюваною величиною.

Безумовно, наведені приклади систем містять не всі типи каскадів формування і обробки сигналів і не відбивають усіх режимів роботи контрольно-вимірювальних систем, що керують.

Принципи роботи вхідних і вихідних перетворювачів. Режими їх роботи істотно відрізняються один від одного - вхідні перетворювачі зазвичай використовуються для перетворення змін вимірюваної величини в слабкий електричний сигнал, а вихідні перетворювачі перетворюють потужний сигнал в сильне переміщення. З цієї причини слід розглядати два різні типи приладів.

1. Електричні вимірювальні прилади служать для вимірювання різних електричних величин: сили струму, напруги, опору, потужності, енергії, а також багатьох неелектричних величин, у тому числі температури, тиску, вологості, швидкості, рівня рідини, товщини матеріалу та ін.

У зв'язку з тим, що абсолютно точних приладів немає, показання приладів дещо відрізняються від дійсного значення вимірюваних величин. Різниця між вимірним і дійсним значенням величини називається абсолютною похибкою приладу. Якщо, наприклад, в ланцюзі сила струму $I = 10\text{A}$, а амперметр, включений в цей ланцюг, показує $I_{\text{зм}} = 9,85\text{A}$, то абсолютна похибка показання приладу:

$\Delta A = I_{\text{зм}} - I = 9,85 - 10 = -0,15 A_{\text{макс}}$. Наведеної похибкою приладу $\gamma_{\text{пр}}$ називається відношення абсолютної похибки ΔA до максимального значення величини $A_{\text{макс}}$, яку можна виміряти при даній шкалі приладу:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A \cdot 100\%}{A_{\text{макс}}} \quad (8.1)$$

Наведена похибка приладу, що знаходиться в нормальних робочих умовах (температура 20°C, відсутність поблизу приладу феромагнітних мас, нормальне робоче положення шкали і т. Д.), Називається основною похибкою приладу.

Приклад. Нехай при вимірюванні сили струму $I = 4A$ в нормальних умовах користувалися амперметром зі шкалою 0...10A і він показував, що сила струму в ланцюзі 4,1A. Обчислити основну (наведену) похибка приладу, що характеризує його точність.

Рішення.

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A \cdot 100\%}{A_{\text{макс}}} = \frac{4,1 - 4 \cdot 100}{10} = 1\%$$

Залежно від основної похибки електровимірювальні прилади поділяються на вісім класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Цифра класу точності показує величину допустимої основної (приведеної) похибки $\Delta A_{\text{макс}}$ приладу у відсотках незалежно від знака похибки.

Клас точності:

$$K = \frac{\Delta A_{\text{макс}} \cdot 100\%}{A_{\text{макс}}} \quad (8.2)$$

Прилад, у якого клас точності виражений меншим числом, дозволяє виконувати вимірювання з більшою точністю.

Знаючи клас точності приладу і найбільше значення величини, яку можна виміряти при даній шкалі приладу, можна визначити найбільшу можливу абсолютну похибку виконаного виміру:

$$\Delta A_{\text{макс}} = \pm \frac{KA_{\text{макс}}}{100\%} \quad (8.3)$$

Приклад. Припустимо, що найбільша сила струму, яку можна виміряти даними амперметром, становить 15A, а клас точності приладу $K = 4$. Визначити найбільшу можливу абсолютну похибку при виконанні вимірювання в будь-якій точці шкали.

Рішення:

$$\Delta A_{\text{макс}} = \pm \frac{KA_{\text{макс}}}{100} = \pm \frac{4 \cdot 15}{100} = 0,6$$

Чим ближче вимірювана величина до максимального значення, яке дозволяє виміряти прилад, тим менша виходить відносна похибка при інших рівних умовах. Цю обставину слід враховувати при виборі межі вимірювання приладу для виконання вимірювання.

Електровимірювальні прилади класифікуються за родом вимірюваної величини, принципом дії, ступеня точності і роду вимірюваного струму, крім того, вони діляться на експлуатаційні групи.

За родом вимірюваної величини прилади діляться на амперметри, вольтметри, омметри, ватметри, лічильники, електротермометри, електротахометри (вимірюють число оборотів в хвилину) і ін. За принципом дії вимірювального механізму прилади можуть бути наступних систем: електромагнітної, магнітоелектричної, електродинамічної, феродинамічної, індукційної, випрямної, термоелектричної, електронної, вібраційної і електростатичної.

В залежності від роду струму, для вимірювання якого призначені прилади, вони діляться на прилади, що вимірюють змінний струм, постійний струм, і прилади, що вимірюють змінний і постійний струми.

Випускають прилади трьох основних експлуатаційних груп: А, Б і В. Прилади поділяються:

По роду вимірюваної величини:

- Амперметр;
- Вольтметр;
- Омметр;
- Ватметр;
- Частотомір;

По принципу дії приладу системи дії приладу бувають:

- Магнітоелектричні;
- Індукційні;
- Термоелектричні;
- Випрямні;
- Електромагнітні;
- Електродинамічні;
- Феродинамічні.

По роду вимірюваного струму:

- Змінний;

- Постійний;
- Змінний та постійний;
- Трьохфазний.

По положенню приладу при вимірюванні:

- Вертикальне;
- Горизонтальні;
- Під кутом 30° .



Рис. 8.1. Вольтметр стрілочний

На шкалі кожного приладу електровимірювання умовними знаками вказані необхідні відомості про конструкції та експлуатації приладу. Наприклад, (рис. 8.1.) на шкалі вольтметра зазначено: вольтметр (V) електромагнітної системи; призначений для вимірювання змінної напруги (~) в межах від 0 до 500 в; при вимірах напруги прилад слід встановлювати вертикально (\perp); ізоляція випробувана напругою; клас точності; рік випуску; експлуатаційна група..

До електровимірювальні прилади всіх систем пред'являються наступні технічні вимоги:

- точність і надійність в роботі і низька вартість;
- споживання по можливості малої потужності;
- здатність не вносити помітних змін в електричні параметри вимірюваного ланцюга;
- більше рівномірні поділу в межах робочої частини шкали;
- здатність витримувати можливо велику перевантаження;
- тривалий термін служби без погіршення своїх якостей;
- надійна ізоляція струмоведучих частин від корпусу;
- показання практично не повинні залежати від впливу зовнішніх факторів;

- стрілки приладів повинні швидко встановлюватися у відповідного розподілу шкали.

2. Електромагнітні вимірювальні прилади. Будову електромагнітного вимірювача із плоскою котушкою показано на рис. 8.2.

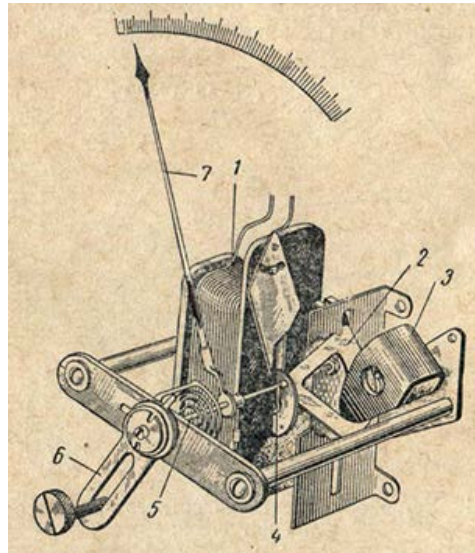


Рис. 8.2. Будова електромагнітного вимірювального приладу із плоскою котушкою: 1 – плоска котушка, 2 – сегмент заспокоювача, 3 – постійний магніт, 4 – вісь, 5 – пружина, 6 – коректор, 7 – стрілка.

Нерухома частина приладу являє собою плоску котушку 1 з обмоткою з ізолюваного мідного дроту. Кінці обмотки приєднуються до затискачів приладу. Рухома частина приладу має вісь 4, встановлену в підп'ятниках, на якій містяться сталевий сердечник, стрілка 7 і сегмент заспокоювача 2. Спиральна пружина 5, що створює протидіючий момент, з'єднана одним кінцем з коректором 6, а іншим - з віссю. У вирізі коректора поміщається ексцентричний штифт з головкою гвинта.

Коли по обмотці котушки протікає електричний струм, створюється магнітне поле і сталевий сердечник втягується в котушку. Залежно від сили струму в обмотці сердечник втягується в котушку в більшій чи меншій мірі, повертаючи на деякий кут вісь зі стрілкою.

Одночасно зі збільшенням відхилення рухомої частини приладу зростає протидіє момент, створюваний закручуванням спіральної пружини. При певному положенні рухомої частини вимірювального приладу протидіє момент повністю врівноважує крутний момент, а стрілка за шкалою приладу вказує вимірювану величину

При виключенні струму стрілка під дією спіральної пружини 5 повертається у вихідне положення.

Втягування сердечника відбувається незалежно від того, який струм (постійний або змінний) протікає по обмотці. У тому і іншому випадку струм збуджує магнітне поле, що діє на сердечник, а останній при змінному струмі відповідно перемагнічується. Тому електромагнітні прилади придатні для вимірювання як в ланцюгах постійного струму, так і в ланцюгах змінного струму.

Для встановлення стрілки на нуль служить коректор 6. При повороті ексцентричного штифта він діє на нижнє плече коректора і відхиляє його. Верхня частина коректора, переміщаючись, тягне за собою спіральну пружину, яка повертає вісь разом зі стрілкою і встановлює останню на нуль. Щоб при вимірах стрілка приладу можливо швидше зупинялася, у відповідного розподілу шкали передбачено спеціальний пристрій - заспокоювач. Найбільш часто застосовують магнітоіндукційні і повітряні заспокоювачі.

Дія магнітоіндукційного заспокоювача засноване на використанні вихрових струмів. При переміщенні алюмінієвого сегмента заспокоювача між полюсами постійного магніту в сегменті виникають вихрові струми.

Взаємодія магнітного поля постійного магніту і вихрових струмів створює, згідно з правилом Ленца, необхідне гальмування (заспокоєння) сегмента, а отже, і всієї рухомої частини приладу зі стрілкою. Дія повітряного заспокоювача засноване на використанні опору повітря, яке зустрічає рухливе легке крило, що переміщається усередині закритого корпусу.

Конструкція електромагнітного приладу з круглою котушкою показана на рис. 8.3. Нерухома частина приладу являє собою круглу котушку з обмоткою. Усередині її укріплений нерухомий сталевий сердечник. Рухомий частиною приладу служить вісь, до якої прикріплений рухомий сталевий сердечник. На осі встановлена стрілка, що переміщається уздовж шкали. З віссю через спіральну пружину з'єднаний коректор.

Коли по обмотці котушки протікає струм, кінці сердечників намагнічуються з однаковою полярністю і в результаті цього рухливий сердечник, відштовхуючись від нерухомого, повертає вісь із стрілкою на деякий кут.

Електромагнітні прилади використовуються переважно для вимірювань змінних струмів і напруг промислової частоти.

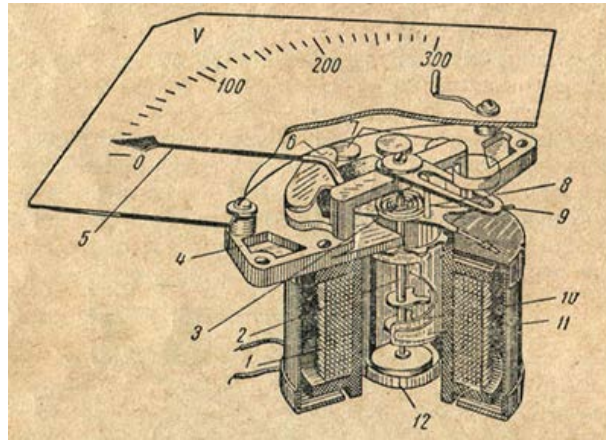


Рис. 8.3. Пристрій електромагнітного приладу з круглою котушкою: 1 – котушка, 2 – вісь, 3 – пружина протидії, 4 – обойма з заспокоювачем, 5 – стрілка, 6 – сегмент заспокоювача, 7 – магніти заспокоювача, 8 – утримувач пружини, 9 – коректор, 10 – яркір, 11 – рухомий стрижень, 12 – алюмінієвий стаканчик.

До достоїнств цих приладів відносяться простота пристрою, дешевизна і надійність в експлуатації, придатність для вимірювання постійного і змінного струму, висока стійкість до короточасних перевантажень. Недоліками їх є нерівномірність початкової частини шкали, залежність показань від впливу зовнішніх магнітних полів, порівняно велика споживана потужність.

Магнітоелектричні прилади. Магнітоелектричний прилад (рис. 8.3) складається з постійного магніту N-S, з м'якої сталі 1, полюсних наконечників 5, сталевго циліндра 8 і легкої алюмінієвої рамки 7, на яку намотана тонка ізольована дрiт. До рамки, встановленої на двох півосях, прикріплений утримувач стрілки 3 зі стрілкою 2. Рамка пов'язана з протидіють пружинами 4. Для встановлення стрілки на нуль служить коректор.

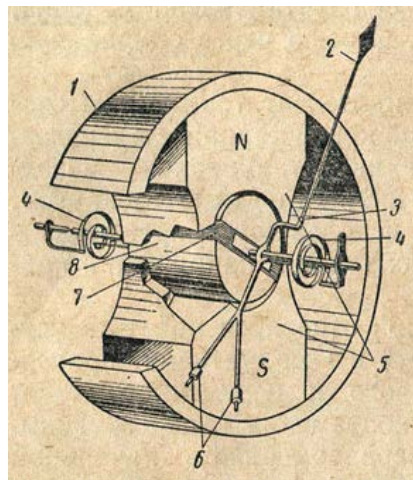


Рис. 8.3. Пристрій магнітоелектричного приладу: 1 – магнітопровід, 2 – стрілка, 3 – держач стрілки, 4 – пружина протидії, 5 – полюсні стрижні, 6 – балансові ваги, 7 – рамка з обмоткою, 8 – сталевий циліндр

Робота приладу заснована на впливі магнітного поля постійного магніту на струм, що протікає по обмотці рамки, в результаті цього рамка повертається в напрямку, що залежить від напрямку струму.

На затискачах приладів магнітоелектричної системи є позначення «+» і «-», які вказують, як треба включати прилад, щоб стрілка відхилилася уздовж шкали.

При обертанні алюмінієвої рамки в магнітному полі постійного магніту в рамці, як у витку, індукується струм. Взаємодія цього струму з магнітним полем забезпечує заспокоєння коливань рухомої частини приладу при її відхиленні.

До достоїнств приладів магнітоелектричної системи відносяться: висока точність, мале власне споживання потужності, рівномірність шкали, незалежність показань від впливу зовнішніх магнітних полів; а до недоліків - непридатність для безпосереднього вимірювання змінного струму, порівняно висока вартість і чутливість до перевантажень.

Термоелектричні прилади. Термоелектричні вимірювальні прилади служать переважно для вимірювань змінних струмів високої частоти (до 25 МГц).

Принцип дії такого приладу заснований на використанні двох явищ: а) виділення тепла при проходженні електричного струму по провіднику; б) появі постійної е.р.с. при нагріванні місця спаю термопари.

Термоелектричний вимірювальний прилад являє собою поєднання гальванометра магнітоелектричної системи з термоперетворювачем, що складається з нагрівача і термопари.

Схема приладу термоелектричної системи наведена на рис. 8.4.

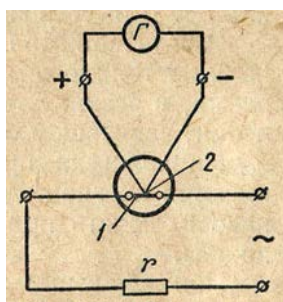


Рис. 8.4. Схема приладу термоелектричної системи: 1 – нагрівач, 2 – місце спаювання

Вимірюваний змінний струм протікає по нагрівачу 1, який виділяє тепло, нагріває місце спаю 2 термопари. На холодних кінцях термопари утворюється термо-е.р.с., під дією якої в ланцюзі гальванометра виникає

вимірюваний їм електричний струм. Нагрівач з термопарою називають термоперетворювачем. Він міститься в одному корпусі з гальванометром або окремо від неї.

Так як величина термо-е.р.с., що виникає на холодних кінцях термопари, залежить від струму, що протікає по нагрівачу, то стрілка гальванометра показує за шкалою, відрадуйований одиницях струму, силу протікає в ланцюзі змінного струму.

Термоелектричні прилади виготовляють у вигляді щитових і переносних; вони відрізняються високою точністю вимірювань. Головним їх недоліком є мала перевантажувальна здатність термоперетворювача - вони витримують перевантаження по струму приблизно в 1,5 рази.

Електродинамічні прилади. Основними частинами електродинамічного приладу (рис. 8.4) є: нерухома котушка 2 і рухлива котушка 1, розташована на осі 6, до якої прикріплена стрілка 5. Вісь пов'язана з алюмінієвим крилом повітряного заспокоювача 4, розміщеного в камері 3.

Струм до рухомої котушці підводиться через спіральні пружини 7, що створюють протидіючий момент. З нижньої пружиною з'єднаний коректор 8.

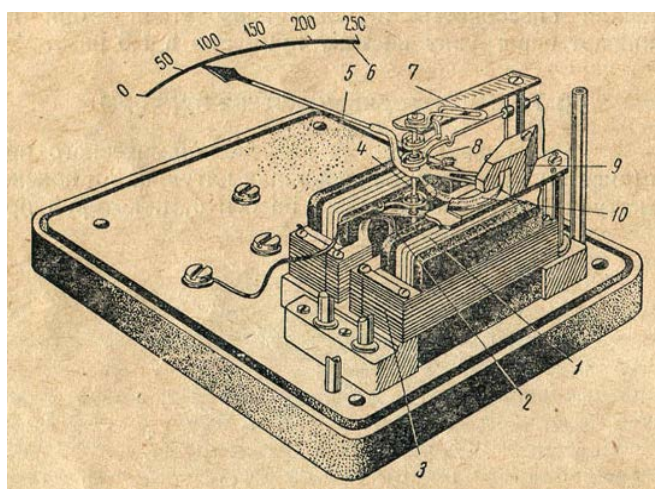


Рис. 8.4. Пристрій феромагнітного приладу: рухлива котушка – 1, нерухома котушка – 2, камера – 3, вісь пов'язана з алюмінієвим крилом повітряного заспокоювача – 4, стрілка – 5, вісь – 6, спіральні пружини – 7, коректор – 8

Робота приладів електродинамічної системи заснована на взаємодії струмів в двох обмотках. Сила цієї взаємодії повертає рухому обмотку разом з віссю і стрілкою. Кут повороту залежить від сили струму, що протікає по обмотках, і сили протидії спіральних пружин.

Електродинамічні прилади можна застосовувати в колах постійного і змінного струму. Це пояснюється тим, що зміна напрямку змінного струму

відбувається одночасно в обох котушках, внаслідок чого напрямок сили взаємодії між ними залишається незмінним.

Електродинамічні прилади вживають для вимірювання сили струму, напруги та потужності.

До переваг приладів цієї системи поряд з можливістю використання їх в колах постійного і змінного струму відноситься висока точність. Недоліками їх є вплив зовнішніх магнітних полів на результати вимірювання, велике власне споживання потужності, відносно мала стійкість до перевантажень, мала чутливість і висока вартість. Різновидом приладів електродинамічної системи є широко розповсюджені, головним чином як щитових ватметрів, феродинамічні прилади (рис. 8.5), дія яких заснована на тому ж принципі.

Однак на відміну від приладів електродинамічної системи у феродинамічних приладів нерухомі обмотки поміщаються на сталевому сердечнику, який підсилює магнітне поле і крутний момент приладу, а також зменшує вплив зовнішніх магнітних полів на його свідчення. Котушки електродинамічних приладів з'єднуються між собою залежно від їх призначення. У амперметрах котушки в більшості випадків з'єднують паралельно, в вольтметрах - послідовно, а в ватметрах одна котушка включається в ланцюг послідовно, як амперметр, а інша - паралельно навантажена, як вольтметр.

Індукційні прилади. До приладів індукційної системи відноситься лічильник (рис. 8.5), який служить для урахування споживання електричної енергії.

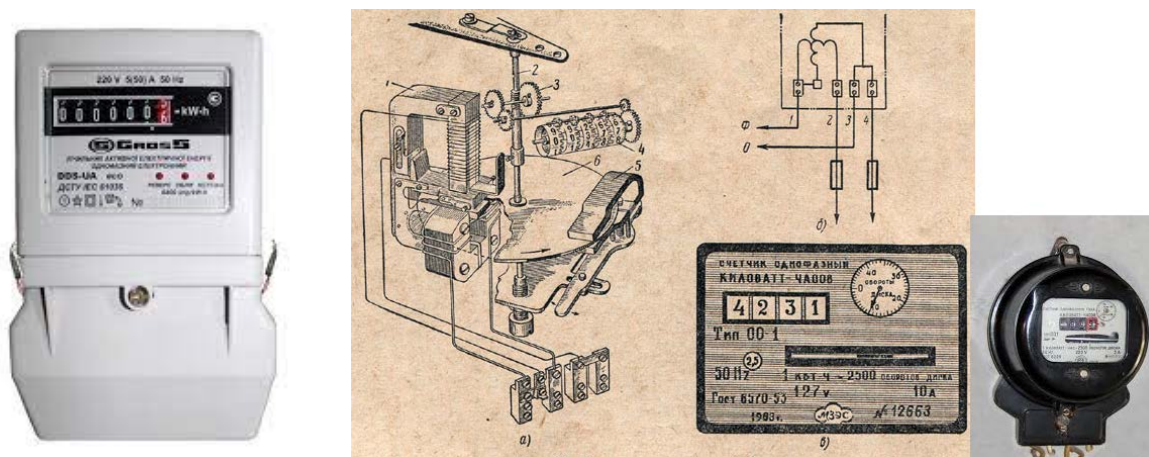


Рис.8.5. Лічильник електричної енергії: а) – пристрій, б – схема, в – таблиця, 1 – магнітна система, 2 – вісь, 3 – передаточні шестерні, 4 – лічильний механізм, 5 – гальмовий механізм, 6 – алюмінієвий диск

Основна частина лічильника – магнітна система 1 з двома обмотками. Одна обмотка включається в ланцюг послідовно, а інша – паралельно. Зміні струми, які йдуть по обмоткам, збуджують змінні магнітні потоки, які утворює магнітне поле що обертається. Ці потоки пронизують алюмінієвий диск 6 лічильника та індують у ньому вихрові струми. Дія змінного магнітного поля, що утворене магнітними потоками, на вихрові струми, змушує рухатися диск. Вісь 2 диску через шестерні 3 передає рух лічильному механізму.

Вплив магнітного поля на вихрові струми пропорційно добутку миттєвих значень струму і напруги, т. Е. Пропорційно потужності, отже, на диск впливає обертовий момент, пропорційний потужності:

$$M_{ep} = K_{ep} P, \quad (8.4)$$

де K_{ep} - постійний коефіцієнт.

Диск лічильника при своєму обертанні проходить між полюсами постійного гальмівного магніту 5 і перетинає його магнітні лінії.

В результаті цього постійний магніт також індукує в диску вихрові струми. Взаємодія магнітного поля постійного магніту і вихрових струмів створює необхідне гальмування диска, пропорційне швидкості його обертання.

8.2. Електромеханічні вимірювальні перетворювачі струму та напруги

В електромеханічних перетворювачах вимірювана величина (найчастіше напруга чи струм) перетворюється в кутове переміщення рухомої частини приладу. Електромеханічні перетворювачі поділяються за принципом дії на: магнітоелектричні; електромагнітні; електродинамічні (і феродинамічні); електро-статичні; індукційні.

Застосовують для вимірювання постійних струмів і напруг (ампер-метри та вольтметри), опорів (омметри), заряду (гальванометри і кулонметри).

Принцип дії приладів магнітоелектричної системи побудований на взаємодії магнітного поля постійного магніту зі струмами у провідниках обмотки рухомої котушки.

Основними частинами магнітоелектричного приладу є:

- нерухомий постійний магніт 1 для створення в зазорі однорідного магнітного поля; котушка 2, що може обертатися навколо осі;

- спіральні пружини 3, призначені для створення моменту протидії та для забезпечення електричного контакту між рухомою котушкою та нерухомою вимірювальною схемою;
- стрілка 4, яка жорстко зв'язана з рухомою котушкою, та шкала з нанесеними поділками і цифрами.

Застосовуються для вимірювання постійних і змінних струмів і напруг, а та-кож для вимірювання частоти і кута зсуву фаз у колах змінного струму.

Електромагнітний прилад складається з:

- котушки 1 із щілиноподібним отвором;
- феромагнітного осердя 2, несиметрично закріпленого на осі;
- стрілки 3, прикріпленої до осі;
- спіральної пружини 4, яка створює момент протидії.

Дія електромагнітного приладу ґрунтується на взаємодії магнітного поля котушки з рухомим феромагнітним осердям. Внаслідок цієї взаємодії осердя втягується в котушку і рухома вісь повертається на деякий кут під дією обертального моменту, який пропорційний квадрату струму.

1.Магнітоелектричні прилади

Магнітоелектричний вимірювальний перетворювач. Принцип дії магнітоелектричних вимірювальних перетворювачів полягає у взаємодії поля постійного магніту з магнітним полем рамки (котушки), по якій протікає вимірюваний струм.

Основні елементи конструкції магнітоелектричного вимірювального перетворювача наведені на рис. 8.6.

Постійний магніт, полюсні наконечники і циліндричне осердя складають магнітну систему механізму. В рівномірному проміжку між полюсними наконечниками 1 постійного магніту і осердям створюється сильне радіально-рівномірне магнітне поле, в якому знаходяться дві сторони рамки 2 з мідної чи алюмінієвої проволочки. По витках рамки протікає постійний струм, пов'язаний відомою залежністю з вимірюваною електричною величиною (тобто з вимірюваним струмом чи напругою). Цей струм підводиться до рамки через спіральні пружини 3. Рамка закріплена між двома півосями. На одній із півосей закріплена стрілка 4, кінець якої переміщується над шкалою 5.

Магнітне поле постійного магніту N-S (рис. 8.6), взаємодіючи зі струмами в тих частинах рамки, що знаходяться в просторі між полюсними наконечниками і осердям, створює обертальний момент, який намагається

повернути рамку так, щоб через площину, охоплену її витками, проходив максимальний магнітний потік. При повороті рамки закручуються спіральні пружини 3 і створюється протидійний момент. Поворот рамки припиниться, коли протидійний момент стане рівним обертальному. В цьому стані рухомої частини за положенням стрілки над шкалою 5 можна визначити значення вимірюваної величини.

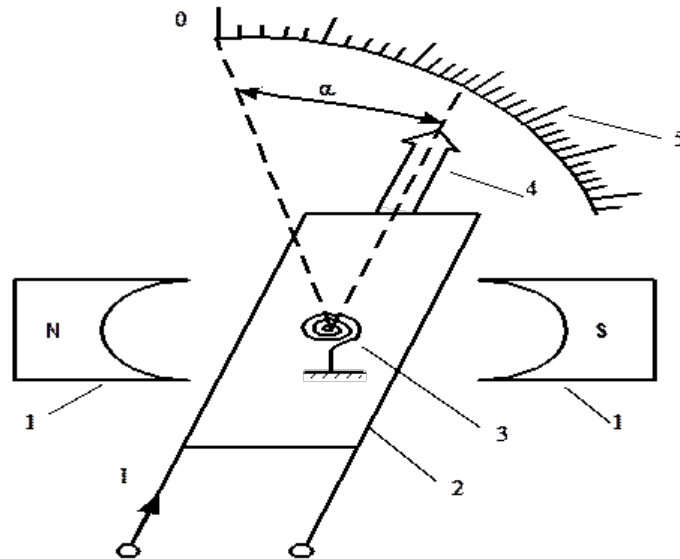


Рис. 8.6. Основні елементи конструкції магнітоелектричного вимірювального перетворювача

Значення обертального моменту $M_{об}$, як показано раніше, можна визначити як похідну від енергії електромагнітного поля W_e за кутом повороту рухомої частини α :

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha} \quad (8.5)$$

Якщо площина рамки перпендикулярна лініям потоку (на рис.8.6 це відповідає вертикальному положенню рамки), то магнітне потікозчеплення з нею дорівнює повному потікозчепленню ψ_0 магнітного потоку з витками рамки. Енергія електромагнітного поля в цьому випадку:

$$W_e = \psi_0 I \quad (8.6)$$

де I – струм у провідниках рамки.

При повороті рамки в радіально-рівномірному магнітному полі на кут $d\alpha$ відбувається зміна потікозчеплення на $d\psi_0 = \psi_0 d\alpha$ і зміна енергії на величину $dW_e = \psi_0 d\alpha I$.

Звідси обертальний момент:

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha} = \psi_0 I \quad (8.7)$$

де $\Psi_0 = BS w$; B – індукція магнітного поля постійного магніту; S – площа рамки (катушки); w – кількість витків рамки (катушки).

Таким чином, обертальний момент пропорційний струмові I в рамці.

Протидійний момент M_{np} , який виникає при повороті рамки та закручуванні пружини, пропорційний куту повороту рамки α :

$$M_{np} = W_{nm} \alpha \quad (8.8)$$

В статичному режимі роботи рухома частина буде знаходитись у рівновазі, коли:

$$M_{об} = M_{np} \quad (8.9)$$

Прирівняємо (8.7) і (8.9):

$$BS w I = W_{nm} \alpha \quad (8.10)$$

і отримаємо рівняння перетворення магнітоелектричного ВП:

$$\alpha = \frac{BS w}{W_{nm}} I \quad (8.11)$$

Подамо (8.11) у такому вигляді:

$$\alpha = S_I I \quad (8.12)$$

де $S_I = BS w / W_{nm}$ - чутливість магнітоелектричного вимірювального перетворювача.

Проаналізуємо рівняння (8.12).

1. Якщо напрям струму зміниться на протилежний, то відповідно зміниться і напрям обертального моменту. Отже, за допомогою магнітоелектричного ВП можна вимірювати тільки постійний струм (або напругу).

2. Статична характеристика $\alpha=f(I)$ даного перетворювача лінійна, оскільки чутливість:

$$S_I = BS w = const \left| \begin{array}{l} B = const \\ S = const \\ w = const \end{array} \right. \quad (8.13)$$

3. В зв'язку з тим, що чутливість у магнітоелектричних ВП постійна, вони мають рівномірну шкалу.

4. До переваг магнітоелектричних ВП (у порівнянні з іншими типами електромеханічних ВП) відносять також високу чутливість, мале споживання енергії від об'єкта вимірювання, малий вплив на покази приладів зовнішніх магнітних полів).

5. До недоліків відносять такі: неможливість вимірювання змінних струмів (без додаткових перетворювачів), мала здатність до перевантажень, відносно висока вартість та складність вимірювального механізму.

Магнітоелектричні амперметри. Магнітоелектричний вимірювальний механізм, включений безпосередньо в коло вимірюваного струму, дозволяє виміряти невеликі струми (до 20-50 мА). При збільшенні струму більше допустимого відбувається нагрівання пружин, які служать для створення протидійного моменту і одночасно – для підведення струму до рамки. Пружини втрачають свої пружні властивості, змінюється чутливість механізму, і прилад може втратити свої первісні властивості. Таким чином, сам вимірювальний механізм може служити тільки як мікро- або міліамперметр.

Для збільшення верхніх меж вимірювання магнітоелектричних приладів за струмом використовуються шунти. Шунт являє собою резистор, виготовлений з манганіну – сплаву, опір якого мало залежить від температури. Приєднується шунт паралельно до вимірювального механізму ВМ (рис.8.7).

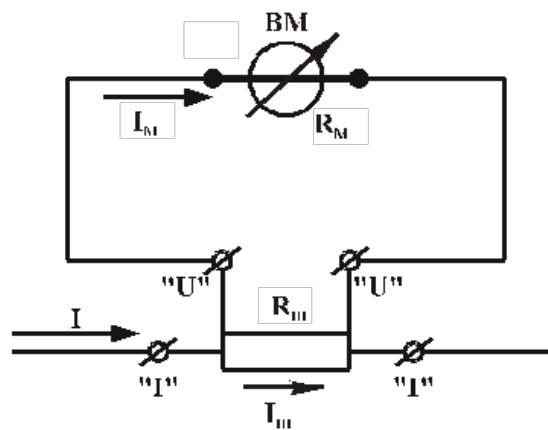


Рис.8.7. Схема вимірювального механізму ВМ

Опір шунта $R_{ш}$ при вимірюванні великих струмів I багато менший від опору вимірювального механізму $R_{м}$, тому велика частина вимірюваного струму I йде через шунт ($I_{ш}$), а струм $I_{м}$ через рамку механізму не перевищує допустимого значення I_0 . Для зменшення впливу опору контактів і підвідних проводів шунти виробляються з чотирма затискачами: струмовими ("I"- "I") та потенціальними ("U"- "U").

Відношення вимірюваного струму до струму через механізм $I/I_{м}$ називається коефіцієнтом шунтування n .

Для схеми рис.8.7 справедливі такі рівняння:

$$I = I_{ш} + I_{м}; I_{ш} \cdot R_{ш} = I_{м} \cdot R_{м} \quad (8.14)$$

Крім того,

$$I / I_{м} = n. \quad (8.15)$$

З цих рівнянь при заданих трьох величинах можна знайти дві інші. Наприклад, якщо відомий опір вимірювального механізму R_m , струм повного відхилення механізму $I_m = I_0$, максимальне (номінальне) значення вимірюваного струму $I = I_n$, то можна знайти n як:

$$\begin{aligned} n &= I_n / I_0, \\ R_{ш} &= R_m / (n - 1). \end{aligned} \quad (8.16)$$

Шунти на невеликі струми (до кількох десятків ампер) умонтовуються в корпус амперметра, а для великих струмів (до декількох сотень ампер) застосовуються зовнішні шунти.

Стандартні зовнішні шунти виробляються на певні номінальні спади напруг (45, 60, 75, 100 та 300 В) з класами точності 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Клас точності шунта означає гранично припустиме відхилення опору шунта від номінального значення (у відсотках).

Магнітоелектричні вольтметри. Для одержання магнітоелектричного вольтметра послідовно з механізмом вмикається додатковий резистор R_d (рис.8.8), який обмежує струм в рамці механізму до припустимих значень.

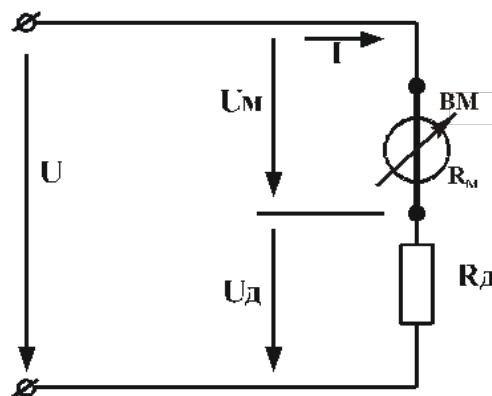


Рис. 8.8. Схема підключення

Для схеми рис.8.8 маємо:

$$U = U_m + U_d = I \cdot R_m + I \cdot R_d \quad (8.17)$$

Відношення вимірюваної напруги U до спаду напруги на механізмі U_m часто називають коефіцієнтом ділення m :

$$m = U / U_m. \quad (8.18)$$

Використавши співвідношення (8.16) та (8.17), можна визначити необхідні величини для вольтметра при заданих інших. Наприклад, якщо маємо механізм з опором R_m та струмом повного відхилення, рівним I_0 , і потрібно одержати вольтметр з верхньою межею вимірювання U , то:

$$m = U / U_m = U / I \cdot R_m, \text{ а } R_d = R_m \cdot (m - 1). \quad (8.19)$$

Додаткові резистори (опори) R_d виготовляють із термостабільних матеріалів, наприклад, із манганінового дроту. Вони, як і шунти, можуть бути внутрішніми (при напрузі до 600 В) та зовнішніми (при напругах від 600 В до 30 кВ). Додаткові резистори виробляються на номінальні струми 0,5; 1; 3; 5; 7,5; 15; 30 та 60 мА і можуть мати класи точності 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 та 1,0.

Для компенсації температурної похибки магнітоелектричних амперметрів та вольтметрів у їх вимірювальні кола вмикаються елементи, параметри (опори) яких залежать від температури. Схеми вмикання цих елементів і їх параметри вибираються такими, щоб похибка приладів від впливу температури була якомога меншою.

У багатомежевих магнітоелектричних амперметрів та вольтметрів шунти та додаткові резистори складаються із декількох частин.

Магнітоелектричні гальванометри. Гальванометрами називають магнітоелектричні прилади з високою чутливістю до струму або напруги. Рухома частина їх закріплюється найчастіше на розтяжках або підвісах. Шкали гальванометрів або зовсім не градуйовані, або градуйовані орієнтовно. Гальванометри використовують для вимірювання досить малих (до 10^{-12} А) струмів та (до 10^{-8} В) напруг, а також для вимірювання кількості електрики в імпульсі. Останні називаються балістичними гальванометрами. Дуже широко гальванометри застосовуються як нуль-індикатори в приладах порівняння.

Гальванометри за способом відліку поділяються на стрілкові та дзеркальні (тобто із світловим відліком). У деяких дзеркальних гальванометрів використовуються окремі від всього приладу (так звані виносні) шкали. Чутливість таких приладів не є постійною величиною, вона залежить від установленної відстані між шкалою та дзеркалом, яке закріплене на рухомій частині механізму.

Рамка в гальванометрах виконується безкаркасною, повітряні заспокоювачі відсутні, тому режим руху рухомої частини визначається як характеристиками механізму, так і опором зовнішнього кола.

Розглянемо це питання трохи докладніше. Висновки з цього розгляду будуть корисні при вивченні принципу роботи балістичного гальванометра. Уявимо собі, що гальванометр вмикається на струм I , при цьому припускаємо, що струм в колі гальванометра стрибком зростає від нуля до значення I .

Застосуємо раніше отримане рівняння руху (8.7) для магнітоелектричного гальванометра. При цьому маємо на увазі, що обертальний момент

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha} = \Psi_0 I \quad (8.20)$$

Моментом опору $k \cdot G^{1.5}$ в лівій частині рівняння (8.7) знехтуємо тому, що рухома частина гальванометра установлена на розтяжках або підвісах, і момент опору в опорах відсутній.

Тоді диференціальне рівняння для магнітоелектричного гальванометра матиме вигляд:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W_{mm} \alpha = \Psi_0 I \quad (8.21)$$

Для магнітоелектричних ВП момент заспокоєння M_3 складається з двох частин – повітряного моменту заспокоєння $M_{п}$, який виникає в результаті тертя рамки об повітря, та індукційного моменту заспокоєння M_i , який виникає в результаті взаємодії струму, індукованого в рамці при її русі в проміжку, з магнітним потоком постійного магніту: $M_3 = M_i + M_{п}$. Момент повітряного заспокоєння $M_{п} \ll M_i$, тому ним у першому наближенні можна знехтувати і вважати $M_3 = M_i$. Розглянемо, від чого залежить індукційний момент заспокоєння.

При русі рамки в її витках виникає е.р.с.:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\Psi_0 \frac{da}{dt} \quad (8.22)$$

Ця е.р.с. створює в колі гальванометра струм:

$$i = -\frac{e}{R_r + R_3} \quad (8.23)$$

де R_r – опір рамки гальванометра; R_3 – опір зовнішнього кола, на яке замкнута рамка гальванометра.

Від взаємодії струму із потоком виникає індукційний момент заспокоєння:

$$M_i = -\Psi_0 \cdot i = -\Psi_0 \cdot \frac{e}{R_r + R_3} = \frac{\Psi_0^2}{R_r + R_3} \cdot \frac{da}{dt} \quad (8.24)$$

де $[Y_0^2 / (R_r + R_3)] = P_i$ – коефіцієнт індукційного заспокоєння, який набагато більший за коефіцієнт повітряного заспокоєння $P_{п}$.

Тому можна вважати остаточною коефіцієнт заспокоєння $P \gg P_i$. Тоді рівняння руху матиме вигляд:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P_i \frac{d\alpha}{dt} + W_{nm} \alpha = \Psi_0 I \quad (8.25)$$

Рівняння (8.25) описує рух рухомої частини гальванометра (і взагалі будь-якого магнітоелектричного механізму з внутрішньорамковим магнітом). Це рівняння – диференціальне другого порядку, лінійне, неоднорідне. Для нього характеристичне рівняння буде таким:

$$JS^2 + P_i S + W_{nm} = 0 \quad (8.26)$$

Корені цього характеристичного рівняння:

$$S_1 = -\frac{P}{2J} + \sqrt{\left(\frac{P_i}{2J}\right)^2 - \frac{W_{nm}}{J}}; \quad S_2 = -\frac{P}{2J} - \sqrt{\left(\frac{P_i}{2J}\right)^2 - \frac{W_{nm}}{J}}; \quad (8.27)$$

В залежності від співвідношення $(P_i / 2J)^2$ і W_{nm} / J можуть бути дійсні різні, дійсні рівні та комплексно-спряжені. J та W_{nm} – конструктивні параметри, їх змінити не можна, а P_i залежить від опору зовнішнього кола, отже, змінюючи опір зовнішнього кола, можна змінювати режим руху рухомої частини. Коли $(P_i / 2J)^2 > W_{nm} / J$, тобто коли коефіцієнт заспокоєння P_i великий, а зовнішній опір малий, характер руху аперіодичний перезаспокоєний (крива 1 на рис. 8.9).

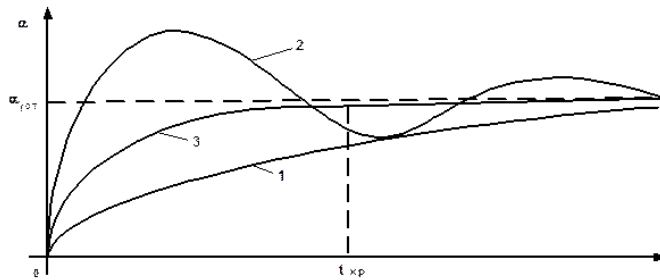


Рис. 8.9. Графік руху

При великому R_3 характер руху коливальний недозаспокоєний (крива 2 на рис. 8.9). При опорі зовнішнього кола $R_3 = R_{кр}$, який називається критичним, рухома частина заспокоюється, тобто зупиняється, повернувшись на кут $\alpha_{уст}$ за мінімально короткий час $t_{кр}$. Режим руху в цьому випадку також називається критичним (крива 3 на рис. 8.9).

Магнітоелектричні омметри. Існують дві схеми омметрів: одна – з послідовним вмиканням вимірюваного опору R_x та вимірювального механізму ВМ (рис. 8.10, а), інша – з паралельним (рис. 8.10, б). Для омметра з послідовною схемою струм через вимірювальний механізм (при натиснутій кнопці Кн) дорівнює:

$$I = \frac{E}{R_M + R_x + R_D} \quad (8.28)$$

відхилення рухомої частини:

$$\alpha = S_1 \cdot I = \frac{S_1 \cdot E}{R_M + R_X + R_D} \quad (8.29)$$

Відхилення α є функцією R_X , воно максимальне при $R_X = 0$, тобто нуль знаходиться на шкалі приладу справа.

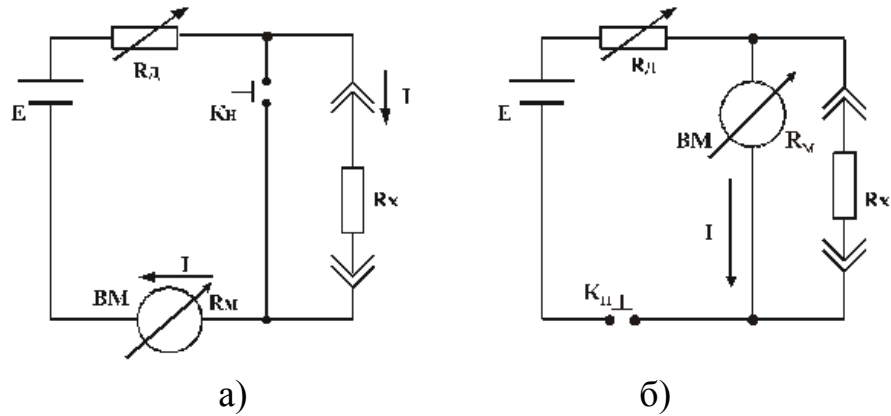


Рис. 8.10. Схеми омметрів

Для омметра з паралельною схемою:

$$\alpha = S_1 \cdot I = \frac{S_1 \cdot E}{\frac{R_M \cdot R_X}{R_M + R_X} + R_D} \cdot \frac{R_X}{R_M + R_X} = \frac{S_1 \cdot E \cdot R_X}{R_M \cdot R_X + R_D (R_M + R_X)} \quad (8.30)$$

Відхилення $\alpha = 0$ при $R_X = 0$, тобто нуль знаходиться на шкалі приладу зліва. Максимальне відхилення α буде при $R_X = \infty$, тому омметри з паралельною схемою використовуються для вимірювання малих опорів, а з послідовною – для великих. Шкали омметрів нерівномірні.

Такі омметри виготовляються переносними з живленням від сухих елементів. У процесі експлуатації напруга на затискачах сухих елементів змінюється і може відрізнятись від тієї, яка була при градуванні приладу. Тому перед кожним вимірюванням в омметрі з послідовною схемою при натиснутій кнопці K_n потрібно встановлювати показ “0” зміною опору R_D , а в омметрі з паралельною схемою потрібно встановити показ “0” при непідключеному R_X . Це є недоліком таких омметрів. Цього недоліку не мають омметри, які використовують механізм-логометр.

В логометричному механізмі (рис.8.11) в проміжку обертаються дві рамки, жорстко скріплені між собою. Протидійних пружин в цьому механізмі немає. Струм підводиться до рамок через безмоментні струмопідводи, які являють собою тонкі стрічки з відпаленого сплаву.

Проміжок між осердям та полюсними наконечниками в цьому механізмі нерівномірний, отже, магнітне поле у проміжку також

нерівномірне. Струми I_1 та I_2 , які протікають в рамках, створюють два обертальних моменти, які направлені назустріч один одному. Під дією різниці між двома моментами рухома частина повертається.

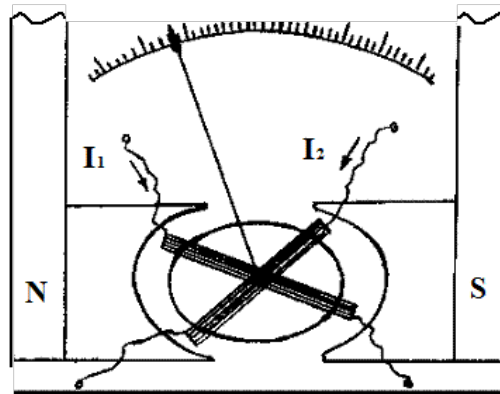


Рис. 8.11. Логометричний механізм

Оскільки поле нерівномірне, то при повороті рухомої частини один з моментів збільшується, а інший – зменшується і при певному куті повороту моменти стають рівними один одному, а рухома частина зупиняється. При відсутності струмів у рамках рухома частина може знаходитись у будь-якому з можливих положень або, як кажуть, займати байдуже положення.

Енергія магнітного поля кожної із рамок дорівнює:

$$W_{eM1} = Y_1(a) \cdot I_1; W_{eM2} = Y_2(a) \cdot I_2 \quad (8.31)$$

де $Y_1(a)$ та $Y_2(a)$ – магнітні потокозчеплення рамок, які залежать від кута повороту a .

Оскільки поле у проміжку механізму неоднорідне, то залежності магнітних потокозчеплень Y_1 та Y_2 від кута повороту a різні. Моменти, які створюються рамками:

$$M_1 = \frac{d\Psi_1(\alpha)}{d\alpha} \cdot I_1, M_2 = \frac{d\Psi_2(\alpha)}{d\alpha} \cdot I_2. \quad (8.32)$$

При рівновазі $I_1 \cdot \frac{d\Psi_1(\alpha)}{d\alpha} = I_2 \cdot \frac{d\Psi_2(\alpha)}{d\alpha}$, звідки:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d\Psi_1(\alpha)}{d\alpha} : \frac{d\Psi_2(\alpha)}{d\alpha} \quad (8.33)$$

або

$$\alpha = F(I_1/I_2). \quad (8.33)$$

Таким чином, кут відхилення рухомої частини логометра визначається відношенням струмів у рамках (в перекладі з грецької “логос” – відношення).

Схема логометричного омметра наведена на рис. 8.12. Для цієї схеми маємо:

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{U}{R_1 + R_d + R_x} : \frac{U}{R_2 + R_H}\right). \quad (8.34)$$

або:

$$\alpha = f\left(\frac{R_2 + R_H}{R_1 + R_d + R_x}\right). \quad (8.35)$$

де R_1 та R_2 – опори рамок, R_H та R_d – додаткові опори.

З виразу (8.35) видно, що відхилення α залежить від R_x і не залежить від напруги живлення.

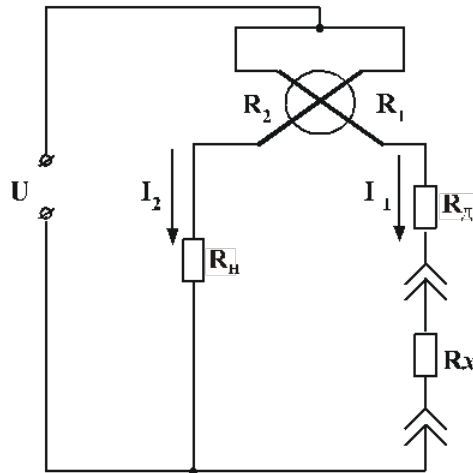


Рис. 8.12. Схема омметра з логометричними вимірювальними механізмами

Існують омметри з логометричними вимірювальними механізмами, напруга живлення в яких виробляється електромеханічними генераторами, які приводяться до роботи вручну. Використовуються вони для вимірювання великих опорів (наприклад, опорів ізоляції, які мають значення в десятки та сотні МОм).

Випрямні вимірювальні прилади. Магнітоелектричні прилади, як уже відмічалось, мають багато переваг: висока точність та чутливість, мала споживана потужність, мало зазнають впливу зовнішніх магнітних полів та температури. Але вони не можуть безпосередньо вмикатись для вимірювання змінного струму. Цю перешкоду на шляху застосування магнітоелектричного механізму для вимірювань на змінному струмі можна обійти застосуванням перетворювачів змінного струму у постійний.

У залежності від виду перетворювача розрізняють випрямні, термоелектричні та електронні прилади.

Випрямні прилади являють собою поєднання випрямляча з магнітоелектричним вимірювальним механізмом. У сучасних приладах у випрямлячах використовуються напівпровідникові діоди. Найбільше

застосовувані кремнієві діоди, які мають малу власну ємність і можуть працювати в діапазоні практично від 0 Гц і до 10^5 Гц.

Випрямлячі, які використовуються у випрямних приладах, бувають однопівперіодні та двопівперіодні.

Схема приладу з однопівперіодним випрямленням змінного струму наведена на рис. 8.13, а, а на рис. 8.13, б зображений графік струму через вимірювальний механізм.

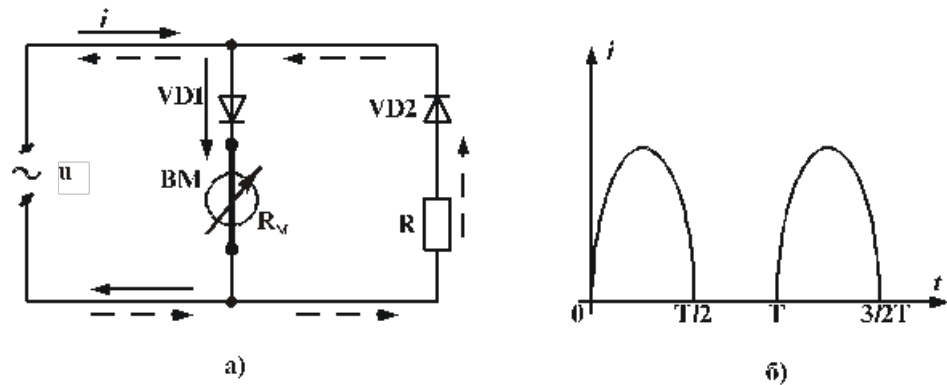


Рис. 8.13. Схема приладу з однопівперіодним випрямленням змінного струму наведена – а, графік струму через вимірювальний механізм – б

На рис.8.13, а суцільними стрілками показаний шлях струму за один із півперіодів змінного струму. На рис.8.13, б цьому відповідає струм на інтервалі від 0 до $T/2$, або від T до $3/2T$ і т.д., де T – період змінного струму (або напруги). Протягом другого півперіоду струм йде шляхом, указаним штриховими стрілками. При цьому припускаємо, що діоди $VD1$ та $VD2$ мають характеристики ідеальних вентилів, тобто опір відкритого діода (в провідному напрямі) дорівнює нулю, а закритого – нескінченності. Опір $R = R_M$, де R_M – опір вимірювального механізму BM .

При використанні двопівперіодного випрямляча (рис.8.14, а) струм через рамку вимірювального механізму проходить протягом обох півперіодів (рис.8.14, б).

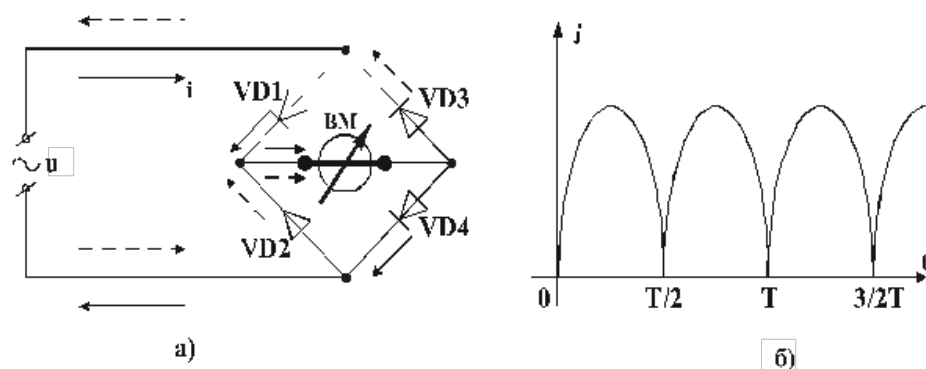


Рис.8.14. Двопівперіодний випрямляч

В додатному півперіоді струм на рис.8.14, *a* протікає шляхом, позначеним суцільними стрілками, а в від'ємному півперіоді – штриховими стрілками, але через вимірювальний механізм ВМ струм в обидва півперіоди йде в одному напрямі. Внаслідок інерційних властивостей вимірювального механізму положення рухомої частини механізму (і вказівника) визначається середнім за період значенням оберտального моменту $M_{об.ср.}$, який, в свою чергу, пропорційний середньому значенню струму $I_{ср.}$, що протікає через рамку :

$$M_{об.ср.} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{об}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \Psi_0 i(t) dt = \Psi_0 \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \Psi_0 I_{ср.} \quad (8.36)$$

де $M_{об.}(t)$ – миттєве значення обертального моменту. Рівняння перетворення приладу має вигляд:

$$\alpha = \frac{\Psi_0}{W_{nm}} I_{ср.} \quad (8.37)$$

Для синусоїдної форми вимірюваних електричних величин випрямні прилади градууються, як правило, у діючих значеннях. Для визначення діючих значень несинусоїдних кривих струму за показами випрямного приладу потрібно робити перерахунок показів з урахуванням коефіцієнта форми кривої.

Весь попередній розгляд роботи випрямного приладу був оснований на тому, що характеристики діодів приймалися ідеальними. При використанні реальних діодів необхідно враховувати нелінійність вольт-амперної характеристики діода (особливо на початковій її ділянці), розкид опорів діодів як у прямому, так і у зворотному напрямках, частотну залежність опорів діодів та інші фактори. Тому вимірювальні кола реальних випрямних приладів складніші від розглянутих тут.

Для розширення меж випрямних приладів за струмом використовуються, як і в звичайних магнітоелектричних приладах, шунти (рис.8.15, *a*), а за напругою – додаткові опори R_d (рис.8.15, *б*) та подільники напруги.

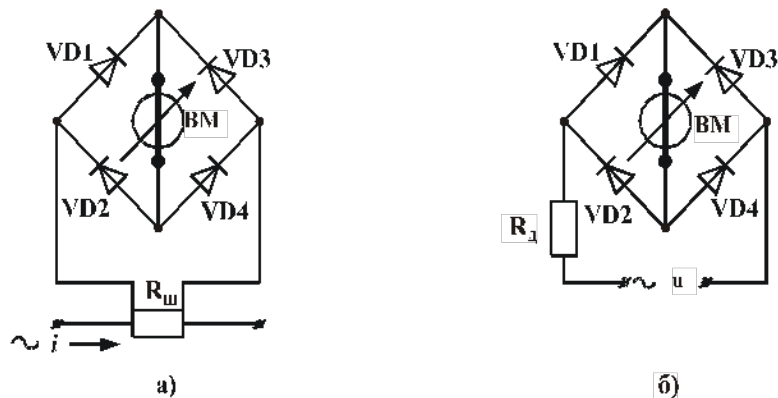


Рис. 8.15. Використання шунтів

До переваг випрямних приладів відносяться висока чутливість, компактність, доволі широкий частотний діапазон. Випрямні прилади часто виробляються комбінованими. До недоліків відносяться: мала точність (1,5; 2,5; 4,0), залежність показів від форми кривої.

Термоелектричні прилади. Термоелектричні прилади являють собою поєднання термоелектричного перетворювача та магнітоелектричного вимірювального механізму. Термоелектричний перетворювач перетворює вимірюваний змінний струм i в постійну е.р.с. E , яка діє на вимірювальний механізм ВМ (рис.8.16).

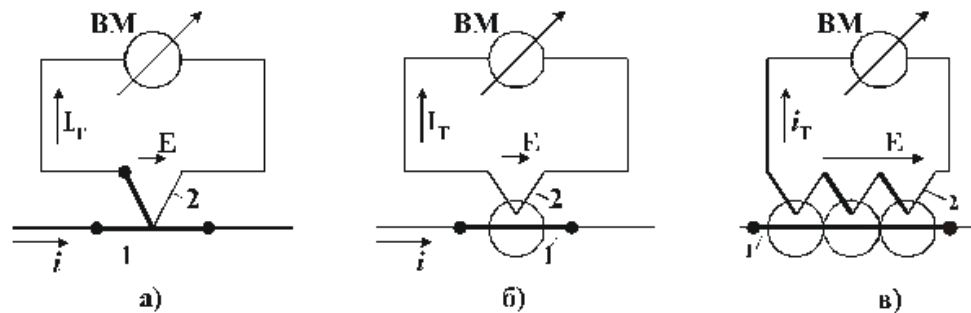


Рис. 8.16. Термоелектричний перетворювач

Термоперетворювач являє собою нагрівач 1 та термопару 2. Термопара може мати безпосередній електричний контакт з нагрівачем (рис.8.16, а) і може мати тільки тепловий контакт з нагрівачем через електроізолювальний матеріал (рис.8.16, б та в), який має високу теплопровідність.

Контактні перетворювачі мають меншу інерційність, ніж безконтактні, але вони допускають великий витік струмів високої частоти і застосовуються на частотах не вище 5-10 МГц. Безконтактні перетворювачі можуть використовуватись на частотах до сотень мегагерц. Крім того, безконтактні термоперетворювачі можна з'єднувати в батареї (рис.8.16, в), що дозволяє підвищити чутливість приладу.

Перетворювачі малих струмів поміщають у скляну колбу, з якої викачане повітря, при цьому зменшуються втрати тепла від нагрівача, зменшується потужність, необхідна для нагрівання спаяних кінців термопари.

Струм через вимірювальний механізм прямо пропорційний е.р.с. термопари: $I_T = E/R_n$, де R_n – опір кола термопари. Відхилення а рухомої частини механізму пропорційне цьому струмові: $a = S_I \times I_T$. Е.р.с. термопари пропорційна різниці температур гарячого спаю термопари та її холодних кінців DT : $E = K \times DT$, де K – коефіцієнт пропорційності. Температура холодних кінців відповідає температурі навколишнього середовища.

Різниця температур D_T пропорційна потужності, яка виділяється вимірюваним струмом i в нагрівачі термопари, тобто квадрату діючого значення вимірюваного струму: $DT = K_T \cdot I^2$, де K_T – коефіцієнт, який визначається характеристиками термоперетворювача. Таким чином, струм через вимірювальний механізм:

$$I_T = E / R_n = K \cdot DT / R_n = K \cdot K_T \cdot I^2 / R_n. \quad (8.38)$$

Відхилення вказівника при постійному коефіцієнті m , який дорівнює $(\Psi_0 \cdot K \cdot K_T) / (W_{nm} \cdot R_H)$, пропорційне квадрату діючого значення вимірюваного струму (незалежно від форми кривої струму), тобто рівняння перетворювача термоелектричного приладу є квадратичним.

$$\alpha = \frac{\Psi_0}{W_{nm}} I_T = \frac{\Psi_0 \cdot K \cdot K_T}{W_{nm} \cdot R_H} I^2 = m \cdot I^2 \quad (8.39)$$

Термоелектричні прилади застосовують для вимірювання змінних струмів від 100 мкА до 100 А, напруг – від 75 мВ до 600 В в діапазоні частот від 0 до 100 МГц. Багато з термоелектричних приладів мають по декілька меж. У амперметрів до 1 А на кожній межі використовується окремий термоперетворювач, при вимірюванні струмів більше 1 А для розширення меж використовуються спеціальні високочастотні трансформатори. Для розширення меж вимірювань за напругою застосовуються додаткові опори у вигляді недротових безреактивних резисторів.

Основними перевагами термоелектричних приладів є можливість вимірювання струмів та напруг високих частот, мала залежність їх показів від форми кривої. До недоліків відносяться невисока чутливість та точність (класи точності 1,0-4,0), мала перевантажувальна здатність, квадратичний характер шкали, значне споживання енергії. Застосовувати термоелектричні прилади для вимірювань на низьких частотах недоцільно, оскільки тут краще використовувати більш точні та надійні прилади інших систем.

До переваг електромагнітних приладів належать їхня простота, дешевизна, надійність, здатність витримувати короточасні навантаження, а також придатність для вимірювання в колах змінного й постійного струму.

Недоліками приладів електромагнітної системи є порівняно низька точність, нерівномірність шкали, досить велика споживана потужність, залежність показів від частоти та впливу зовнішніх магнітних полів.

Принцип дії приладів електродинамічної системи ґрунтується на взаємодії провідників зі струмом рухомої котушки з магнітним полем, створеним струмом у нерухокій котушці.

Електродинамічні прилади застосовують найчастіше як ватметри для вимірювання потужності у колах як постійно-го, так і змінного струмів. У такому разі нерухома котушка вмикається послідовно зі споживачем, а рухома – паралельно. Послідовно з рухомою котушкою вмикається додатковий опір для зменшення власного споживання енергії і підвищення точності.

В електродинамічних та феродинамічних амперметрах нерухому і рухому котушки з'єднують послідовно.

Електродинамічні прилади придатні для роботи в колах постійного і змінного струму. У колах змінного струму електродинамічні прилади мають вищу точність порівняно з іншими електромеханічними приладами. Проте на роботу електродинамічних приладів впливають зовнішні магнітні поля.

Електродинамічний прилад складається з таких основних частин: нерухомої котушки 1, яку вмикають, як правило, послідовно зі споживачем; рухомої котушки 2, закріпленої на осі, яку вмикають паралельно споживачеві; спіральних пружин 3, які створюють момент, протидії і за допомогою яких струм подається у рухому котушку; стрілки 4, жорстко скріпленої з рухомою котушкою, та шкали з нанесеними поділками і цифрами

2.Електродинамічні вимірювальні прилади

Найточнішими серед інших підгруп електромеханічних перетворювачів, які використовуються в ланцюгах змінному струму, є електродинамічні перетворювачі. В даний час багато хто з них випускаються з класами точності 0.05 і зберігають свої показання при переході з постійного струму на змінний.

Найбільш широке застосування електродинамічні перетворювачі знаходять як ватметрів постійного і змінного струму, амперметрів постійного і змінного струмів, фазометрів, частотомерів і фарадометров.

Принцип дії електродинамічних перетворювачів заснований на взаємодії магнітних полів струмів, що протікають по нерухомої і рухомої котушок (або системам котушок).

Електродинамічний перетворювач, конструкція якого і схема з'єднання котушок наведені на малюнку 8.17, а, б відповідно, включає в себе в загальному випадку систему нерухомих і рухомих котушок, відліковий пристрій, пружні елементи у перетворювачів з механічним протидіє моментом, заспокоювач та засоби захисту від зовнішніх магнітних полів.

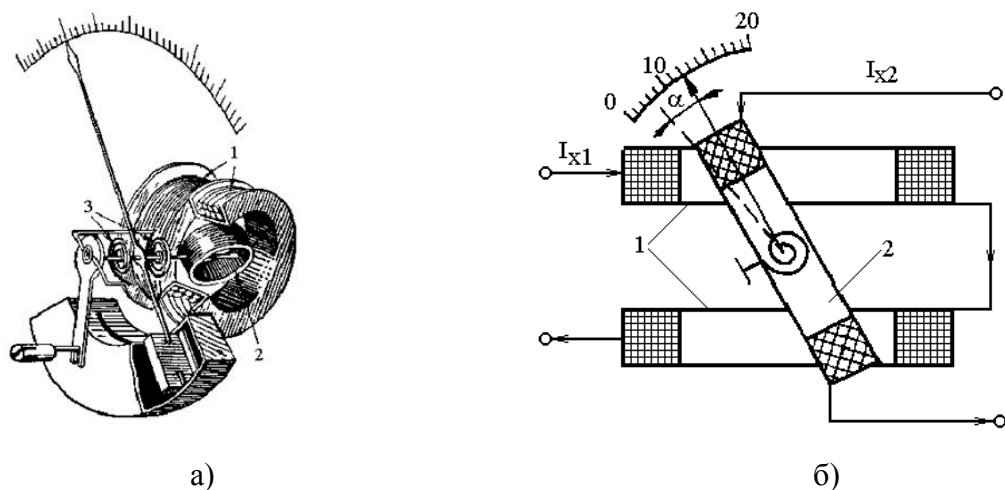


Рис. 8.17. Електродинамічний перетворювач

Нерухомі котушки 1, як правило, виконують з двох секцій, рознесених у просторі. Це створює конструктивні зручності при розміщенні рухомої частини і, крім того, дозволяє зміною відстані між секціями змінювати конфігурацію магнітного поля, що використовується для лінеаризації функції перетворення перетворювача. Виконуються нерухомі котушки, як правило, з мідного дроту. Рухома котушка 2 виконується з мідного або алюмінієвого проводу і розміщується всередині нерухомої. Струмopовідними провідниками рухомої котушки служать пружні елементи (спіральні пружини 3), що створюють механічний протидіючий момент, або безмоментна провідники в логометра.

За формою котушки виконують круглими або прямокутними. Перші з них більш технологічні у виробництві і мають добротність на 15 - 20% вище в порівнянні з прямокутними. Це підвищує чутливість перетворювача. Прямокутні ж котушки використовуються з метою зменшення розмірів приладу.

Найбільш широке поширення в практиці електричних вимірювань знайшли електродинамічні амперметри та вольтметри змінного струму, ватметри постійного і змінного струму і, рідше, фазометри, частотоміри і фарадометри.

Амперметри. У електродинамічні амперметри використовуються послідовне і паралельне включення рухомий 2 і нерухомої 1 котушок. Послідовне включення котушок (рис. 8.18, а) застосовується у амперметра, призначених для вимірювання малих (до 0,5 А) струмів. У цьому випадку струми I_1 і I_2 в нерухомої і рухомої котушках рівні між собою і фазовий зсув між ними j дорівнює нулю, тобто $\cos j = 1$. Вираз для рівняння шкали для такого амперметра запишеться наступним чином:

$$\alpha = \frac{1}{K_{y\phi}} I^2 \frac{dM_{1,2}}{da} \quad (8.39)$$

Шкала приладу в принципі є квадратичної, однак шляхом відповідного вибору форми, розмірів і взаємного розташування котушок можна домогтися такого закону зміни взаємної індуктивності $M_{1,2}$ при зміні кута повороту рухливої частини α , що на ділянці шкали починаючи з 15 - 20% від її верхньої межі вона буде мати практично лінійний характер.

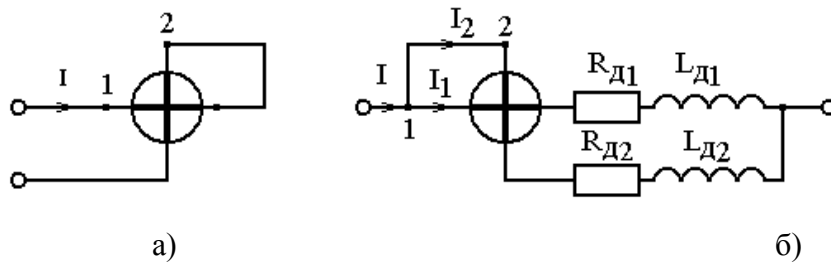


Рис. 8.18. Амперметри на основі електродинамічних перетворювачів

Ваттметри. У електродинамічних ваттметра рухома і нерухома котушки включаються незалежно один від одного (рис. 8.19).

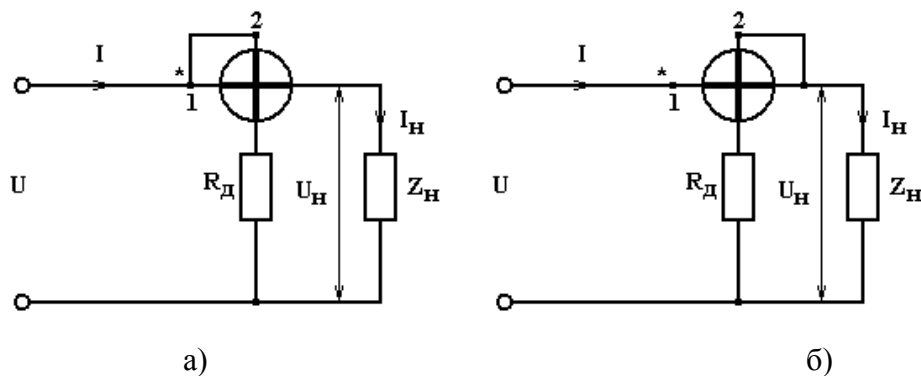


Рис. 8.19. Ваттметри на основі електродинамічного перетворювача

Фазометри. Електродинамічні фазометри створюються на базі логометричного перетворювача. Електрична схема фазометра показана на рисунку 8.20а.

Нерухома котушка 5-6 перетворювача утворює послідовну (струмовий) ланцюг приладу. Рухливі котушки 1-2 і 3-4 утворюють паралельну ланцюг. Послідовно з рухомою котушкою 3-4 включений резистор R_1 , що має активний опір, а послідовно з котушкою 1-2 - комплексне індуктивний опір, утворене резистором R і індуктивністю L . При такій схемі включення фазометра й індуктивному характері навантаження Z_H векторна діаграма фазометра буде відповідати рисунку 8.20, б.

Електродинамічні фазометри дозволяють вимірювати фазові зрушення в межах від 0 до 180 ° (частіше градуюються від плюс 90 до мінус 90 ° з

нулем посередині шкали). Промисловістю випускаються фазометри з класами точності до 0,1. Досить висока точність їх забезпечується завдяки достоїнств, властивим електродинамічним перетворювачів.

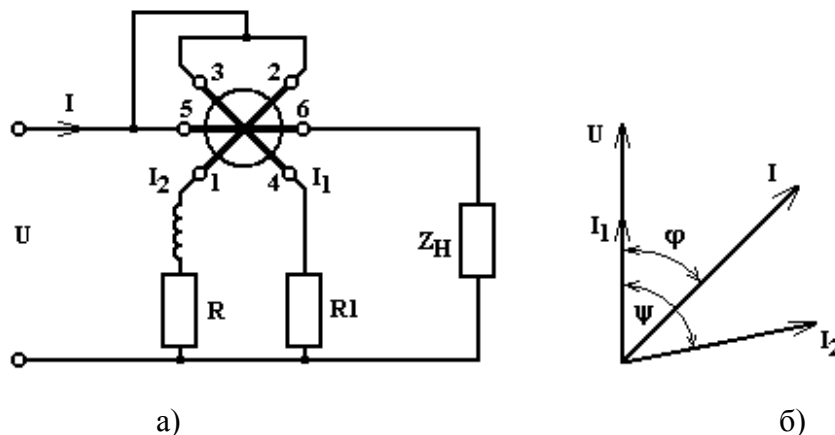


Рис. 8.20. Фазометри на основі електродинамічного перетворювача

Основними недоліками розглянутих фазометрів є те, що вони можуть працювати на фіксованих частотах і напругах. Зміна напруги U вимагає зміни елементів схеми фазометра R і $R1$ (для виконання умови $I1 = I2$), а значить, і характер шкали приладу при цьому зміниться. Зміна частоти також призводить до зміни характеру шкали з-за зміни реактивного опору ланцюга котушки 1-2, а значить, і співвідношення струмів $I1$ і $I2$.

3. Електромагнітні вимірювальні прилади

Відмінною особливістю електромагнітних приладів, що обумовлює їх широке застосування для вимірювань в ланцюгах змінного і постійного струмів в якості щитових амперметрів і вольтметрів, є їх високі експлуатаційні якості: простота конструкції, низька вартість, висока надійність, стійкість до електричних перевантажень, широкий діапазон вимірюваних величин. Основним недоліком цих приладів є невисока точність (вітчизняні електромагнітні прилади випускаються з класами точності до 0,5).

Всі електромагнітні прилади залежно від конструктивного виконання і характеру руху їх рухомої частини можуть бути розділені на резонансні і нерезонансні. Кожна з цих груп приладів у свою чергу ділиться на дві підгрупи: поляризовані і неполяризованих (у поляризованих приладах крім намагнічующої котушки використовуються постійні магніти). Так як резонансні електромагнітні прилади в даний час використовуються дуже рідко, то в цьому посібнику вони не розглядаються. Тут розглянуті лише неполяризованих нерезонансні електромагнітні перетворювачі, найбільш широко застосовуються в електровимірювальній техніці. Основу цих

приладів становлять електромагнітні вимірювальні механізми, що відрізняються як за конструктивним виконанням, так і за своїми властивостями і параметрами.

Принцип дії всіх електромагнітних перетворювачів заснований на взаємодії магнітного поля струму, що протікає в котушці, з феромагнітним осердям. Електромагнітні ПІ можуть бути виконані так, що в результаті взаємодії магнітного поля котушки зі струмом і феромагнітного сердечника останній буде намагнічуватися однойменно з іншим нерухомим сердечником і відштовхуватися від нього (так звані перетворювачі відразливого дії), або ж таким чином, що в результаті впливу магнітного поля котушки зі струмом на феромагнітний сердечник він буде втягуватися в магнітне поле котушки (перетворювач втяжнимі дії).

Всі конструктивні різновиди електромагнітних ПІ можна звести до двох основних типів (рис. 8.21).

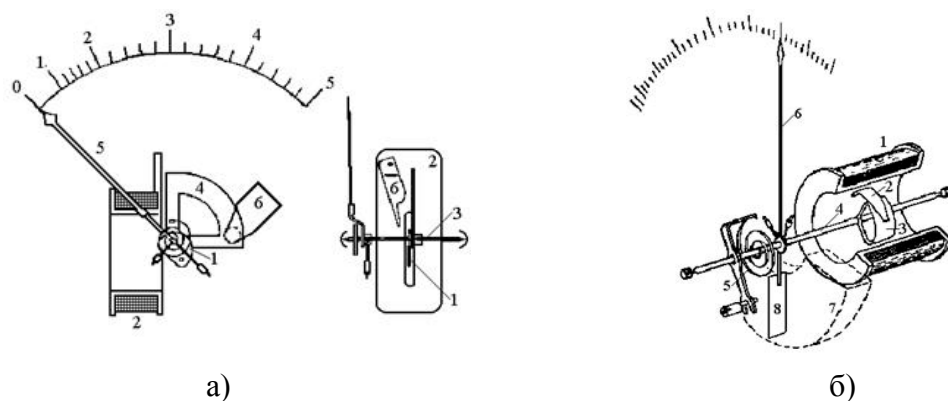


Рис. 8.21. Електромагнітні вимірювальні перетворювачі

Перетворювачі з плоскою котушкою (рис. 8.21, а) складаються з котушки 2, в магнітному полі якої знаходиться феромагнітний сердечник 1 у формі усіченого диска або язичка, ексцентрично закріпленій на осі рухомої частини. При протіканні по котушці струму феромагнітний сердечник втягується в магнітний зазор котушки, повертаючи при цьому вісь 3 з закріпленим на ній заспокоювачем 4 і стрілку 5 у бік збільшення показань. Регулювання кута відхилення рухомої частини здійснюється за допомогою магнітного шунта 6.

Перетворювачі з плоскою котушкою менш технологічні у виготовленні, ніж механізми з круглою котушкою, проте вони мають підвищену чутливість, меншими габаритами і масою.

Перетворювачі з круглою котушкою (рис. 8.21, б) складаються з котушки 1, рухомого 2 і нерухомого 3 феромагнітних сердечників, форма

яких визначається необхідністю отримання необхідного характеру шкали перетворювача. При протіканні по котушці струму рухомий і нерухомий сердечники намагнічуються однойменно. Рухомий сердечник відштовхується від нерухомого, повертаючись разом з віссю 4 і закріпленої на ній стрілкою 6.

Причому сила відштовхування виявляється прямо пропорційної значенням струму, що протікає по котушці. Протидіючий момент створюється за допомогою спіральної пружини 5. Заспокоєння рухомої частини здійснюється повітряним (крилаткою) заспокоювачем, що складається із закритої камери 7 і легкого алюмінієвого крила 8, жорстко пов'язаного з віссю 4 рухливої частини. Перевагою таких перетворювачів є їх простота, висока технологічність виготовлення і можливість отримання необхідного характеру шкали (за рахунок вибору форми сердечників. Конструктивно сердечники можуть бути циліндричними, призматичними або мати іншу форму).

Чутливість таких перетворювачів виявляється нижче, ніж у перетворювачів з плоскою котушкою. З проведеного розгляду можна зробити деякі висновки про властивості, переваги та недоліки електромагнітних перетворювачів: електромагнітні перетворювачі можуть застосовуватися для вимірювань в ланцюгах як постійного, так і змінного струмів, так як напрямок відхилення рухомої частини не залежить від напрямку струму в обмотці.

При застосуванні їх для вимірювань в ланцюгах змінного струму вони вимірюють середньоквадратичне значення струму або напруги;

Точність електромагнітних перетворювачів порівняно невисока внаслідок впливу втрат в сердечниках (на гістерезис і вихрові струми), зовнішніх магнітних полів, температури навколишнього середовища і частоти вимірюваних електричних величин;

Чутливість електромагнітних перетворювачів за винятком перетворювачів із замкнутим магнітопроводом невисока, отже, власне споживання потужності від джерел перетворюваних сигналів у них досить значне.

Функція перетворення електромагнітних перетворювачів за своїм характером є квадратичної, проте відповідним вибором форми і місцем розташування сердечника, тобто закону зміни індуктивності при зміні кута повороту рухливої частини, можна отримати практично рівномірну шкалу на ділянці від 20 до 100% від її верхньої межі;

Електромагнітні перетворювачі найбільш прості по своїй конструкції, мають низьку вартість і надійні в роботі;

Електромагнітні перетворювачі здатні витримувати тривалі електричні перевантаження, так як елементами що підводять струм у них є мідні провідники відповідного перерізу, а не пружні елементи, що створюють протидіючий момент МПР і першими виходять з ладу при перевантаженнях у перетворювачах інших груп;

Діапазон робочих частот для електромагнітних перетворювачів обмежений зверху частотами порядку декількох десятків кілогерц через виникнення великої частотної похибки на високих частотах внаслідок впливу вихрових струмів в сердечнику та інших металевих деталей перетворювача, а також внаслідок зміни індуктивного опору котушки при зміні частоти. Для зменшення додаткових частотних похибок сердечники і магнітопроводи електромагнітних перетворювачів виконуються з магнітом'яких матеріалів з високим питомим опором.

Існують також електромагнітні логометричні перетворювачі, які застосовуються в фазометра, частотомірах, фарадометрах і т.п. Їх основні властивості аналогічні властивостям перетворювачів з механічним протидіє моментом.

Електромагнітні прилади знаходять широке застосування в практиці електричних вимірювань головним чином у вигляді різних щитових та лабораторних амперметрів і вольтметрів змінного струму. Крім того, на базі логометричних перетворювачів створюються фазометри, частотоміри і фарадометри.

Амперметри. Електромагнітні амперметри утворюються шляхом безпосереднього послідовного включення перетворювача в ланцюг вимірюваного струму. Вони використовуються для вимірювання порівняно невеликих струмів, оскільки при великих струмах сильний вплив на показання приладів надають магнітні поля струмопровідних проходів. Щитові амперметри, як правило, виготовляються однопредельними. Лабораторні прилади можуть мати кілька меж вимірювань, які змінюються шляхів секціонування обмотки котушки і включення секцій послідовно або паралельно. Для розширення меж вимірювання амперметрів на великі струми використовуються вимірювальні трансформатори струму.

Вольтметри. Вольтметри утворюються шляхом послідовного включення електромагнітного перетворювача і додаткового резистора R_d .

При цьому для зменшення температурної похибки через зміни опору кола протікання вимірюваного струму відношення опору додаткового резистора R_d , виконуваного зазвичай з манганіну, до опору мідного проводу котушки не повинно бути менше певного значення, що задається допустимою температурною похибкою. Тому в вольтметрах, призначених для вимірювання малих напруг, доводиться зменшувати опір котушки за рахунок зменшення числа її витків, що веде до зниження чутливості приладів. Для уникнення цього, розширення меж виміру вольтметрів у бік малих напруг здійснюється, як правило, не за рахунок зміни r_d , а шляхом секціонування котушок та переходу з послідовного включення секцій на паралельне. Розширення меж вимірювань у бік великих напруг здійснюється до 600 В за допомогою додаткових резисторів, а на більш високі напруги - за допомогою вимірювальних трансформаторів напруги. Через різного характеру частотної залежності додаткового опору r_d і опору котушки у вольтметрів можуть з'являтися додаткові (порівняно з амперметрами) частотні похибки.

Електромагнітні фазометри, частотоміри і фарадометри на базі логометричних перетворювачів скільки-небудь широкого застосування в електровимірювальній техніці не отримали і тому в даному посібнику не розглядаються.

Феродинамічний прилад відрізняється від електродинамічного лише тим, що його нерухомі котушки мають магнітопровід з магнітом'якого матеріалу.

Електродинамічні та феродинамічні перетворювачі і прилади електродинамічної системи, побудовані на їх основі, застосовують для вимірювання потужності, струму, напруги у колах постійного та змінного струмів. Крім того, у колах змінного струму електродинамічні прилади застосовують як частотоміри та фазометри.

Індукційні прилади застосовуються здебільшого як лічильники електричної енергії.

Індукційний лічильник електричної енергії складається з електромагніту 1 з обмоткою, по якій проходить струм споживача (обмотка струму); електромагніту 2 з обмоткою, яка увімкнена паралельно споживачеві (обмотка напруги); постійного магніту 3, призначеного для створення гальмівного моменту; легкого алюмінієвого диска 4, який вільно обертається на осі; механічного редуктора для зменшення частоти обертання диска в задане число разів та механізму відліку.

Принцип дії індукційного лічильника електричної енергії ґрунтується на взаємодії магнітних полів, електро-магнітів зі струмами, наведеними за законом електро-магнітної індукції в алюмінієвому диску.

В результаті такої взаємодії до диска прикладений обертальний момент, значення якого пропорційне активній потужності споживача.

На диск діє також гальмівний момент, який виникає від взаємодії струмів, наведених в диску, з магнітним полем постійного магніту. Значення гальмівного моменту прямо пропорційне частоті обертання диска.

Коли настане рівновага моментів, тобто $M = M_{пр}$ частота обертання диска буде прямо пропорційна активній потужності споживання.

Кількість обертів N за проміжок часу t буде прямо пропорційна електричній енергії W , яку споживає споживач за час t .

Крім однофазних лічильників, випускаються також трифазні лічильники для вимірювання витрат електричної енергії в трифазних енергетичних системах.

До переваг електромеханічних лічильників енергії слід віднести їх простоту, здатність до перевантажень, а також здатність зберігати покази під час вимикання живлення.

Недоліками індукційних лічильників є невисока точність, залежність показів від температури та частоти. Останнім часом інтенсивно розробляються і впроваджуються електронні та цифрові лічильники енергії.

Прилади електростатичної системи застосовуються головним чином як вольтметри для вимірювання на-пруг у колах постійного та змінного струму.

Вольтметр електростатичної системи складається з таких основних частин: системи нерухомих електродів 1 ; системи рухомих електродів 2; спі-ральної пружини 3 для створення моменту протидії та для підведення напруги до рухомих електродів; стрілки 4, закріпленої на осі разом із системою рухомих електродів.

Якщо до рухомих електродів підвести потенціал одного знака, а до нерухомих – іншого, то електроди матимуть заряди протилежних знаків і притягуватимуться один до одного з силою, яка пропорційна заряду електродів. Оскільки заряд прямо пропорційний напрузі, то сила взаємодії, а також обертальний момент будуть прямо пропорційні квадрату прикладеної до електродів напруги.

Позитивними якостями приладів електростатичної системи є здатність вимірювати великі напруги безпосередньо без додаткових пристроїв;

придатність для вимірювання як постійних, так і змінних напруг; незначна потужність, яку споживають прилади; широкий частотний діапазон вимірювання.

Недоліками цих приладів слід вважати низьку точність та чутливість, а також сильний вплив зовнішніх чинників (вологості, електричних полів).

Запитання для самоконтролю до теми 8

1. Класифікація перетворювачів за видом сигналу.
2. Класифікація перетворювачів за вихідним сигналом.
3. Класифікація перетворювачів за характером перетворення вхідної величини у вихідну.
4. Ємнісні перетворювачі.
5. П'єзоелектричні перетворювачі.
6. Електромеханічні перетворювачі.
7. Фотопровідні перетворювачі.
8. Термоелектричні перетворювачі.
9. Основні параметри вимірювальних перетворювачів.
10. Основні групи характеристик перетворювачів.

Тема 9. Аналогові вимірювальні прилади

План

- 9.1. Класифікація АВП
- 9.2. Електромеханічні прилади
- 9.3. Основні метрологічні характеристики

9.1. Класифікація АВП

Аналоговими вимірювальними приладами (АВП) називаються прилади покази яких є неперервними функціями вимірювальних фізичних величин. Залежно від елементної бази, використаної для їх побудови, АВП поділяються на електромеханічні та електронні.



Рис.9. 1 Класифікація аналогових вимірювальних приладів

Електромеханічні прилади принцип дії полягає у перетворенні електромагнітної енергії вимірювального сигналу в механічну енергію переміщення рухомої частини вимірювального механізму.

Електронні АВП звичайно будують на основі магнітоелектричного вимірювального механізму з використанням електронних вузлів - вимірювальних підсилювачів, перетворювачів змінного струму в постійний, функціональних перетворювачів тощо.

Комбіновані прилади призначені для вимірювання декількох величин. Універсальні прилади працюють як на постійному, так і на змінному струмі.

Мультиметри - вимірювальні прилади, призначені для вимірювання декількох електричних величин як на постійному, так і на змінному струмі

9.2. Електромеханічні прилади

Ці прилади широко використовуються у технічних вимірюваннях. Вони прості у конструкції, надійні, мають велику кількість модифікацій, досить точні – до класу точності 0.05.

Загальні вузли й деталі приладів. Корпус приладу захищає вимірювальний механізм від зовнішніх впливів, наприклад, від влучення в нього пилу, в окремих випадках - води й газів. Виконується частіше всього з пластмаси. Може бути основою, на якій збирається весь прилад (рис.9.2).



Рис. 9.2 Загальний вигляд приладів

Для визначення числового значення вимірюваної величини прилади мають відлікові пристрої, що складаються зі шкали та покажчика. Шкала являє собою пластину, що має білу поверхню із чорними відмітками, що відповідають певним значенням вимірюваної величини.

Покажчик являє собою стрілку, що переміщується над шкалою, жорстко скріплену з рухливою частиною приладу. Застосовується також світловий спосіб відліку: на рухливій частині закріплюється дзеркальце, освітлюване спеціальним освітлювачем.

Промінь світла, відбитий від дзеркальця, попадає на шкалу й фіксується на ній, наприклад, у вигляді світлової плями з темною ниткою посередині (рис. 9.3). Світловий відлік дозволяє істотно збільшити чутливість приладу за рахунок того, що

- кут повороту відбитого променя вдвічі більше кута повороту дзеркальця
- довжину променя можна зробити досить великою.

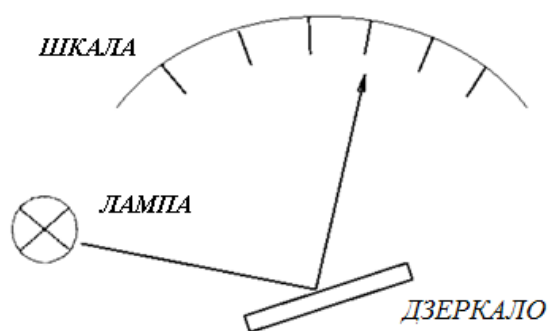


Рис. 9.3. Світловий покажчик

Вибори елементів, що створюють протидіючий момент. Застосовується установка на опорах (при використанні спіральних пружинок), на розтяжках й на підвісі.

Установка на опорах складається з кернів і підп'ятників. Керн – вісь з сталюого дроту.

Підп'ятник – опора під керн, виготовлена із каменю агату або корунду, дуже довговічних, термовологостійких матеріалів, що не бояться агресивних середовищ. Основний недолік цього методу установки - тертя в опорах, що викликає похибки, особливо на початковій стадії руху рухливої частини. Протидіючий момент створюється однією або двома спіральними пружинами, виконаної із олов'яно-цинкової бронзи.

Пружини служать також для підведення струму до рухливих рамок.

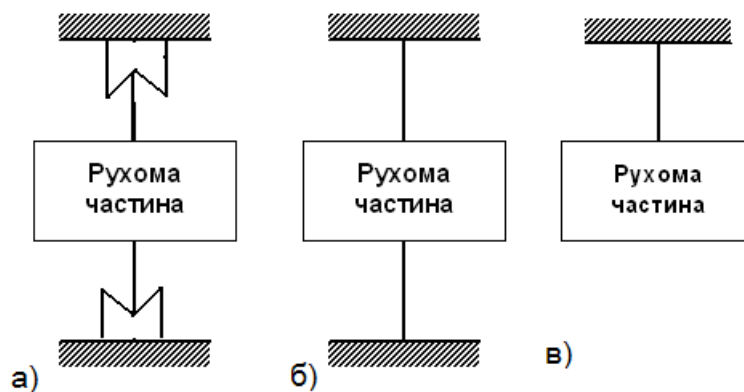


Рис.9.4. Схеми кріплення рухомої частини ВП

Установка на розтяжках найпоширеніша в приладах. Розтяжки являють собою дві тонкі стрічки із бронзового, платино-срібного або кобальтового сплавів, на яких підвішується рухлива частина ВМ. При використанні розтяжок відсутнє тертя в опорах, полегшується рухлива система, підвищується вібростійкість. Розтяжки використовуються також для підведення струму та створення протидіючого моменту. Звичайно довжина розтяжок менше 20 мм, товщина $n \cdot 10^{-2}$ мм, ширина 0,1...0,3 мм. Установку

рухливої частини на підвісі використовують в особливо чутливих приладах (гальванометрах).

Рухлива частина підвішується на тонкій металевій або кварцевій нитці. Струм у рамку рухливої частини підводять через нитку підвісу або спеціальні безмоментні тоководи із золота або срібла. При транспортуванні рухливу частину закріплюють за допомогою аретира. Необхідний ступінь заспокоєння досягається в приладах шляхом застосування спеціальних пристроїв називаних заспокоювачами. Вони бувають: *магнітоіндукційні, повітряні, рідинні*.

Магнітоіндукційні - момент заспокоєння створюється в результаті взаємодії полів постійного магніту і вихрових струмів, що виникають у металевих деталях, що рухаються, які являють собою алюмінієвий диск або короткозамкнений виток з мідного дроту, установлені на рухливій частині. Їхніми перевагами є простота конструкції, зручність регулювання. Застосовуються в тих випадках, коли поле гальмового магніту не впливає на показання приладу (рис. 9.4,а).

Повітряний заспокоювач представляє собою камеру, у якій переміщується легке алюмінієве крило, що жорстко пов'язане з рухливою частиною вимірювального механізму. При переміщенні повітря із однієї камери у іншу через зазор (між крилом та камерою) гальмується рух крила і коливання рухомої частини швидко затухають. Повітряний заспокоювач слабший за магнітоіндукційний.

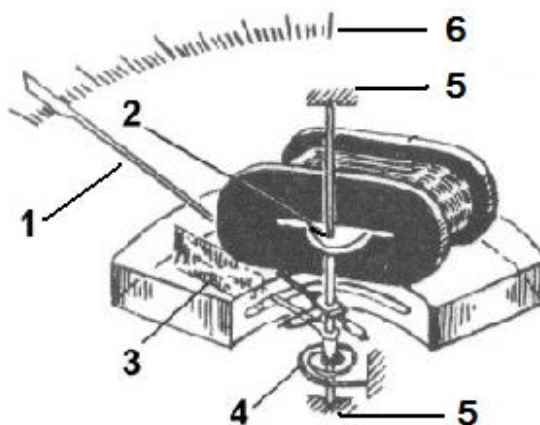


Рис. 9.5 – Конструкція вимірювального механізму: 1- покажчик, 2 – вісь (кern), 3 – повітряний заспокоювач, 4 пружина, що створює протидіючий момент, 5 - підп'ятник, 6 – шкала

Рідинний заспокоювач при коливаннях рухомої частини або її окремих деталей у в'язкій рідині з ними коливається безпосередньо дотичний та

прилиплий до поверхні шар рідини, тоді як більш віддалені шари залишаються у спокої.

Заспокоювачі кожного типу мають свої переваги та недоліки. Так, повітряний та рідинний заспокоювачі не створюють електричних та магнітних полів, що впливають на показання приладів, але відносно складні у виготовленні та регулюванні. Магнітоіндукційні заспокоювачі прості та легко регулюються, але можуть використовуватися тільки тоді, коли поля, що ними створюються не впливають на результати вимірів.

Коректор призначений для установки стрілки у нульове положення, із якого по різних причинах вона може відхилитися.

У вимірювальному колі ВК відбувається перетворення вимірюваної величини X (напруги, струму, потужності, опору тощо) в якусь проміжну електричну величину X_1 (напругу або струм), яка безпосередньо впливає на вимірювальний механізм. До складу ВК можуть входити вимірювальні перетворювачі (шунти, додаткові резистори, подільники напруги, вимірювальні трансформатори струму та напруги), які дають змогу розширити границі вимірювань приладів.

Вимірювальний механізм ВМ переважно складається з нерухомої та рухомої частин, призначений для перетворення електромагнітної енергії сигналу X_1 в кут повороту рухомої частини α .

Відліковий пристрій ВП служить для одержання відліку x приладу і складається з вказівника (стрілкового або світлового), механічно зв'язаного з рухомою частиною ВМ, і нерухомої шкали, яка являє собою сукупність позначок, що зображені на циферблаті.

9.3. Основні метрологічні характеристики

В АВП границю допустимої основної похибки нормують у вигляді *зведеної похибки*.

Клас точності АВП позначають одним числом k , яке дорівнює *границі допустимої зведеної основної похибки* приладу, γ вираженої у відсотках:

$$\gamma_{zp} = \pm \frac{\Delta_{zp}}{x_{нор}} \cdot 100\% = \pm k\% \quad (9.1)$$

АВП можуть мати один із таких класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5.

У приладів з рівномірною шкалою (амперметрів, вольтметрів, ватметрів), в яких нульова позначка розміщена на початку шкали, нормувальне значення $X_{нор}$

дорівнює границі вимірювання приладу X_k , *граничне значення допустимої абсолютної основної похибки* показу приладу дорівнює:

$$\Delta_{zp} = \pm \frac{k \cdot X_k}{100} \quad (9.2)$$

а *граничне значення допустимої відносної основної похибки*:

$$\delta_{zp} = \pm k \frac{X_k}{x} \% \quad (9.3)$$

Варіацією показів називають різницю між окремими показами приладу, що відповідають одному і тому самому значенню вимірюваної величини, а її граничне значення Δ_{zp} не повинне перевищувати границь допустимої основної абсолютної похибки Δ .

Неповернення вказівника приладу ΔL до нульової позначки при плавному зменшенні його показу від максимального до нуля для приладів з рухомою частиною на розтяжках і самописних приладів не повинне перевищувати значення $\Delta_{zp} - 0,01 kL, \text{ мм}$, а для всіх інших приладів - значення $\Delta L_{zp} - 0,005 kL, \text{ мм}$ (де L - довжина шкали, мм).

Основна похибка та варіація показів аналогових вимірювальних приладів визначаються за *нормальних умов застосування*

Додаткові інструментальні похибки температурна похибка, частотна похибка, похибка від впливу зовнішнього магнітного поля, похибка від форми кривої сигналу тощо.

Частотний діапазон АВП позначають так: 45...1000... 4000 Гц, де підкреслена область 45... 1000 Гц становить *нормальний частотний діапазон*, область 1000...4000 Гц – *робочий частотний діапазон*. **Границі вимірювання X_k** вибирають з ряду $X_k = a \cdot 10^n$, де a - коефіцієнт, значення якого залежить від виду вимірюваної величини. Для амперметрів і вольтметрів: $a=1; 1,2; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7,5; 8; n$ - будь-яке додатне чи від'ємне ціле число або нуль. **Внутрішній або вхідний опір** від якого залежить споживання потужності вимірювальним приладом від джерела вимірювального сигналу і, відповідно, значення похибки взаємодії, зумовленої цим споживанням. Внутрішній опір приладів може бути вказаний безпосередньо в метрологічних характеристиках приладу або вказується параметр, за яким можна його обчислювати. Для **вольтметрів та кіл напруги** ватметрів і фазометрів вказують *номінальний струм (струм повного відхилення) $I_{вн}$* , який відповідає границі вимірювання приладу U_k за напругою, а значення опору розраховують за формулою:

$$R_V = \pm \frac{U_k}{I_{VH}} \quad (9.4)$$

Для амперметрів та кіл струму ватметрів і фазометрів вказують номінальний спад напруги у вимірювальному колі приладу U_{AH} , який відповідає границі вимірювання приладу за струмом I_K , а значення опору знаходять за формулою :

$$R_A = \pm \frac{U_{AH}}{I_k} \quad (9.5)$$

Функція перетворення вимірювального механізму Хоча різні електромеханічні прилади мають деякі конструктивні відмінності всі вони мають спільний принцип дії - під час перетворення електромагнітної енергії сигналу X_1 в механічну створюється обертальний момент $M_{об}$ і рухома частина повертається на кут α .

Обертальний момент визначається як похідна від енергії W електромагнітного поля за кутом повороту α

$$M_{об} = \frac{dW}{d\alpha} \quad (9.6)$$

Значення обертового моменту залежить як від величини X_1 , яка безпосередньо впливає на ВМ, так і від параметрів рухомої частини, що відображається функцією кута повороту $f_{об}(\alpha)$:

$$M_{об} = kX_1^n f_{об}(\alpha) \quad (9.7)$$

де k - коефіцієнт пропорційності; n - показник степеня ($n=1$ або 2).

Якби у ВМ діяв тільки обертальний момент $M_{об}$, то рухома частина ВМ відхилялася до крайнього положення не залежно від значення вимірювальної величини. Для того, щоб кожному значенню вимірюваної величини X відповідало певне значення кута відхилення α , обертальний момент $M_{об}$ зрівноважується протидіючим моментом $M_{пр}$, який також є функцією кута повороту і є протилежним до $M_{об}$:

$$M_{пр} = f_{пр}(\alpha) \quad (9.8)$$

У більшості приладів протидіючий момент $M_{пр}$ створюється спіральними пружинами або розтяжками і дорівнює:

$$M_{пр} = W \cdot a \quad (9.9)$$

де W – питомий протидіючий момент пружини чи розтяжки, який характеризує їх пружність.

Статична рівновага рухомої частини ВМ, якщо знехтувати тертям в опорах, настає за рівності обертового та протидіючого моментів:

$$a = kf_{об}(a)X_1^n \quad (9.9)$$

Останнє рівняння називають *функцією перетворення* вимірювального механізму, яка пов'язує покази приладів зі значенням вимірюваної величини і характеризує властивості вимірювального приладу загалом.

Чутливість S_I вимірювального механізму до струму виражають в под/А або мм/А:

$$S_I = \frac{a}{I} \quad (9.10)$$

Чутливість S_U вимірювального механізму до напруги виражають в под/В або мм/В:

$$S_U = \frac{a}{U} = \frac{a}{I \cdot R_{BM}} = \frac{S_I}{R_{BM}} \quad (9.11)$$

Стала вимірювального механізму C – величина, обернена до чутливості.

Стала за струмом $C_I = 1 / S_I$.

Стала за напругою $C_U = 1 / S_U$.

Системи електромеханічних АВП.

Залежно від принципу дії використаного вимірювального механізму, тобто від принципу перетворення електромагнітної енергії вимірювального сигналу в механічну енергію рухомої частини і виду функції перетворення, електромеханічні АВП поділяють на такі *системи*:

- магнітоелектричну,
- електромагнітну,
- електродинамічну,
- феродинамічну,
- електростатичну та
- індукційну,
- випрямну,
- термоелектричну.

В останніх двох системах застосовують магнітоелектричні ВМ з ідповідними перетворювачами змінного струму в постійний.

Запитання для самоконтролю до теми 9

1. Навести класифікацію АВП. Дати характеристику видам приладів.
2. Особливості електромеханічних приладів. Застосування.
3. Які основні метрологічні характеристики приладів? Пояснити їх розрахунок.

Тема 10. Цифрові вимірювальні прилади

План

10.1. Класифікація цифрових вимірювальних приладів

10.2. Принцип роботи

10.1. Класифікація цифрових вимірювальних приладів

Класифікація цифрових вимірювальних приладів аналогічна класифікації методів прямих вимірювань, які поділяються на групу методів зіставлення і групу методів врівноваження.

За фізичною природою вимірюваних величин вимірювання розподіляють на області і види. Під областю вимірювань фізичних величин розуміють фізичні величини, які властиві певній галузі науки та техніки й виділяються своєю специфікою. Вид вимірювань є частиною області вимірювань, що має свої особливості й відрізняється однорідністю вимірюваних величин. Поділ вимірювань на області та види не є сталим, він залежить від об'єктивних і суб'єктивних факторів. Один із варіантів такого поділу вимірювань, прийнятий Держстандартом України розглядає вимірювання:

- геометричних величин (довжини, переміщення, кутів, плоских і складних геометричних форм, шорсткості, круглості та ін.);
- механічних величин (маси, густини, сили, крутного моменту, деформації та ін.);
- параметрів потоку, витрат, рівня й об'єму речовин;
- тиску, вакуумні вимірювання;
- оптичних і оптико-фізичних величин;
- теплофізичних величин і температури;
- часу і частоти;
- електричних і магнітних величин;
- в радіоелектроніці;
- акустичних величин;
- фізико-хімічного складу і властивостей речовин;
- характеристик іонізуючих випромінювань і ядерних констант.

Крім цього вимірювання класифікують за наступними ознаками:

1) за характеристиками точності числових значень вимірюваної величини вимірювання поділяються на два види:

Метрологічні вимірювання, котрі поділяються на:

Вимірювання з максимально можливою точністю відповідно до наявного технічного рівня. Це вимірювання за допомогою еталонів і спрямовані насамперед на відтворення встановлених одиниць фізичних величин або ж фізичних констант.

Контрольно–повірочні вимірювання, похибки вимірювання яких не перевищують деяких наперед заданих значень. До них відносяться лабораторні вимірювання фізичних величин за допомогою зразкових засобів вимірювання високої точності.

Технічні вимірювання – вимірювання що проводяться у промислових умовах і визначаються зазвичай нижчим класом точності засобів вимірювання, ніж у попередніх двох випадках.

2) За числом вимірювань у ряді вимірювань – на разові та багаторазові. Найпоширенішими є одноразові вимірювання, тобто вимірювання фізичної величини виконані один раз. Проте в цілій низці практичних випадків, зокрема при використанні результатів вимірювань для прийняття рішень про стан якогось об'єкта або при виконанні вимірювань з підвищеною точністю, вимірювання одного і того самого розміру фізичної величини здійснюються декілька разів, тобто багаторазово. Отже, до багаторазових вимірювань слід віднести ті вимірювання, результат яких отримують шляхом обробки результатів повторних вимірювань фізичної величини одного і того самого розміру, виконаних більше трьох разів. Це пояснюється тим, що саме за таких умов для обробки результатів вимірювань можуть бути використані методи математичної статистики. Вимірювання одного і того самого розміру фізичної величини, які повторюються два або три рази, допускається називати дво– або триразовими;

3) За характером зміни вимірюваної величини в часі – на статичні та динамічні:

Статичні вимірювання – це вимірювання, при яких протягом певного проміжку часу вимірювана величина майже не змінюється або ж її значення змінюється поступово у відповідності з технологічним процесом.

Динамічні вимірювання – вимірювання, які показують зміну вимірюваної величини в часі при різних збуреннях, що впливають на об'єкт дослідження або ж на спосіб вимірювання. Динамічні вимірювання дають можливість вивчати динамічні властивості об'єкта і засобів вимірювальної техніки, особливо давачів (первинних вимірювальних перетворювачів).

4) За відображенням результатів вимірювання – абсолютні та відносні:

Абсолютними називаються вимірювання, значення яких подані у абсолютних одиницях фізичних величин (тиск у паскалях, довжина у метрах, час у секундах і т.д.).

Відносними називаються вимірювання, значення яких подані як відношення вимірюваної величини до однойменної, умовно прийнятої за одиницю, або ж у відсотках (наприклад, швидкість руху виражена числом Маха, вологість повітря у процентах від повного насичення).

5) За способом одержання числового значення вимірюваної величини – прямі; непрямі (опосередковані, сумісні та сукупні):

При прямому вимірюванні результат одержують безпосередньо за експериментальними даними (вимірювання довжини лінійкою, вимірювання температури термометром, вимірювання тиску манометром). Вони є найпоширенішими.

При непрямому вимірюванні числове значення величини відшуковують не безпосередньо, а на основі вимірювання інших величин, пов'язаних з вимірюваною величиною відомою математичною залежністю (визначення об'єму рідини у циліндричній посудині за висотою рідини в ній та площею дна ; густини рідини за масою і її об'ємом).

Опосередковане вимірювання – непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленнями за результатами вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функційною залежністю. Характерним для опосередкованих вимірювань є функціональне вимірювальне перетворення, яке здійснюється або шляхом фізичного вимірювального перетворення, або шляхом числового вимірювального перетворення.

При сумісних вимірюваннях значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано. Переважно, результати таких вимірювань використовують у наукових дослідженнях.

При сукупних вимірюваннях значення декількох одночасно вимірюваних однорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, що пов'язують їх різні сполучення, що вимірюються прямо чи опосередковано[2] (наприклад, визначення коефіцієнта лінійного теплового розширення). Відповідно, залежно від реалізованого методу вимірювання ЦВП

підрозділяються на ЦВП зіставлення і урівноваження. У всіх ЦВП результат вимірювання видається дискретно в часі.

Для ЦВП зіставлення, або ЦВП паралельної дії, характерна наявність багатоканальної нерегульованої міри МНМ, або багатоканального нерегульованого масштабного перетворювача МНМП, наявність пристрою порівняння для кожного вихідного каналу заходи або масштабного перетворювача, а також розімкнута структурна схема. У ЦВП порівняння реалізується мінімальним складом операцій фактично тільки операція порівняння, так як операція відтворення величини заданого розміру в нерегульованою багатоканальної мірою і операція масштабного перетворення в нерегульованому багатоканальному масштабному перетворювачі реалізуються заздалегідь. Це забезпечує в ЦВП порівняння максимально досягну швидкодію ціною максимальних витрат апаратури.

Структури використовуваних заходів або масштабних перетворювачів визначаються обраної первинної системою числення, в якій виражається числове значення вимірюваної величини. Наприклад, якщо в якості первинної системи числення використовується одинична система, то число вихідних каналів заходи і число пристроїв порівняння дорівнює номінальній числу рівнів квантування. При цьому додатково буде потрібно статичний перетворювач одиничного коду в цифровий код, наприклад, у вигляді діодної матриці. Висока швидкодія, що забезпечується методами порівняння, особливо необхідно для пристроїв вимірювання статистичних характеристик випадкових процесів, в яких інтегрування поєднується з процедурою виміру. Для забезпечення заданої точності в даному випадку необхідно невелике число рівнів, але вельми значне число вимірювань. Це число вимірювань при широкому спектрі сигналу виконують завдяки високій швидкодії за малий інтервал часу.

Крім цього, в структурах порівняння в перетворювачах багатоканального коду в код одночасно з вимірюванням можна реалізувати і будь-яке функціональне перетворення, якщо перетворювач код-код зробити функціональним.

Найбільш поширені ЦВП порівняння, в яких вхідний або проміжної величиною є: напруга, переміщення і інтервал часу. У них зіставляються з зразковими квантованими величинами. У таких приладах кожне з пристроїв порівняння виконано у вигляді елементарно простого чутливого елемента. Таких елементів можна виконати багато і вибрати великим. Тому ЦВП

порівняння для переміщення і інтервалів часу виконуються високої точності, з похибкою м і с. ЦВП порівняння для напруги виконуються з меншим числом ступенів квантування зважаючи на відносно більшої складності ПП. Такі прилади при однакових ПП мають у порівнянні з ЦВП зрівноважування більш високу швидкодію. Інтегральні АЦП порівняння для напруги мають звичайно 6...8 двійкових розрядів при швидкодії до 100 МГц.

Метод порівняння можна реалізувати і для інших величин, наприклад, для частоти (за допомогою набору вузько-смугових фільтрів з смугою пропускання, в цьому випадку вимірювання частоти буде визначатися тільки часом реакції даного смугового фільтра); для фази (якщо передбачити відповідне число смугових імпульсних фазових фільтрів, які пропускають імпульси, котрі розташовані у діапазоні даного кванта фази.) Для фази як відносної величини такий пристрій можна створити і з рухомим фазовим інтервалом, циклічно переміщається у всьому діапазоні від 0 до протягом кожного періоду сигналу.

До цифрових приладів порівняння відносяться, наприклад, цифрові вимірювачі кутових і лінійних переміщень, паралельні АЦП максимальної швидкодії для вимірювання миттєвих значень напруг, цифрові хронометри, частотоміри, фазометри.

Цифрові прилади зрівноважування, або прилади послідовної дії, побудовані за замкнутою схемою. У таких приладах в процесі вимірювання проводиться порівняння відомої компенсує величини і невідомої за значенням величини або величини, пропорційної миттєвому значенню або інтегралу величини, в процесі зрівноважування одна з величин, або величина, пропорційна, змінюється в часі за допомогою цифрового автомата і міри.

Процес зрівноважування триває до моменту зрівнювання величин і, який виявляється одним ПП. Цифрові прилади зрівноважування поділяються на прилади стежить і розгортає урівноваження. ЦВП зрівноважування відрізняються звичайно наявністю одноканальних регульованих заходів.

У ЦВП зрівноважування реалізуються операції відтворення величини заданого розміру, порівняння, запам'ятовування, рідше – операції масштабного перетворення, відтворення, порівняння і запам'ятовування і, нарешті, при використанні одноканального нерегульованого заходу використовуються операції порівняння, масштабного перетворення, множення, підсумовування і запам'ятовування. За останнім методом побудовані так звані конвеєрні ЦВП. Переважна частина ЦВП

зрівноважування виконується з одноканальною регульованою мірою, тобто з одноканальним перетворювачем код-аналог. У цій структурі забезпечується висока точність, максимальна апаратурна простота зважаючи одноканальні заходи і наявності тільки одного ПП, проте швидкодія при цьому знижується. У інтегральних та гібридних АЦП зрівноважування похибка знижена до 0,01 при часу вимірювання (10...1) мкс.

Цифрові прилади врівноважування поділяються на прилади слідкуючого врівноваження урівноваження, що розгортає.

У цифрових приладах, що стежать, компенсуюча величина змінюється за сигналами пристрою порівняння, цифрового автомата ЦА і заходи реверсивно як у бік зменшення, так і у бік збільшення. Ці прилади діляться на прилади з рівномірно–ступінчатою і з нерівномірно–ступінчатою зміною

У цифрових приладах розгортаючого врівноважування компенсуюча величина змінюється повторюваними циклами примусово за заздалегідь заданою програмою в бік збільшення або зменшення цифровим автоматом (ЦА) і мірою.

Цифрові прилади розгортаючого врівноважування, до яких належить більшість цифрових приладів врівноважування, залежно від закону зміни діляться на прилади з рівномірно–ступінчастим і з нерівномірно–ступінчастим, або порозрядними перетворенням.

Цифрові прилади розгортаючого врівноважування з порозрядною зміною характеристик називаються приладами порозрядного врівноваження.

ЦВП врівноважування створюються, головним чином, у вигляді цифрових вольтметрів для постійної напруги, цифрових мостів постійного і змінного струму, цифрових фазометрів урівноваження.

Крім перерахованих основних різновидів останнім часом стали застосовувати самоадаптовуючі ЦВП, а також комбіновані ЦВП, які в першому циклі працюють за методом порівняння, а в другому – методу врівноваження

10.2. Принцип роботи цифрових вимірювальних приладів

Цифровими вимірювальними приладами (ЦВП) називають такі, які відповідно до значення вимірюваної величини утворюють код, а потім відповідно до кодів вимірювану величину представляють на відліковому пристрої в цифровій формі. Код може подаватися в цифрове реєструючий пристрій, обчислювальну машину або інші автоматичні пристрої, що

зумовило широке практичне застосування цих приладів в техніці. Наприклад, такі електронні аналогові прилади, як частотоміри і фазометри, витісняються цифровими приладами, які володіють відносною простотою перетворення цих параметрів в кодовий сигнал.

ЦВП має низку переваг: об'єктивність і зручність відліку результату вимірювання; можливість вимірювань з високою точністю при повній автоматизації процесу вимірювання; високою швидкістю дії і чутливістю; можливістю дистанційної передачі результатів у вигляді коду без втрат точності; поєднанням ЦВП з обчислювальними і різними автоматичними пристроями. До недоліків ЦВП відносяться складність, (отже, мала надійність, і висока вартість), Розвиток мікроелектроніки усувають ці недоліки.

Особливо плідні результати дає використання мікропроцесорів, які дозволяють здійснювати, наприклад, такі функції, як автоматична корекція систематичних похибок, діагностика несправностей, обробка отриманих даних, управління окремими вузлами ЦПП і т.д.

Принцип роботи ЦВП заснований на дискретному поданні безперервних величин.

ЦВП складається з двох обов'язкових вузлів; аналого–цифрового перетворювача (АЦП) і цифрового відлікового пристрою (ВПУ).

АЦП видає код відповідно до значення вимірюваної величини. ОУ відображає це значення в цифровій формі. АЦП застосовуються також у вимірювальних, інформаційних управляючих та інших системах і випускаються промисловістю в якості самостійних засобів вимірювання. Зазвичай вони мають на виході двійковий код і можуть бути значно швидше діяти в порівнянні з АЦП, застосовуваними в ЦВП.

Швидкодія ж ЦВП обмежується інерційністю зорового сприйняття. Багато ЦВП містять попередні аналогові перетворювачі (АП). Їх використовують для зміни масштабу вхідної величини X або її перетворення в іншу величину $y = f(x)$, більш зручну для обраного методу кодування.

Метрологічні та інші технічні характеристики ЦВП визначаються ***методом перетворення в код. В ЦВП***, призначених для вимірювання електричних величин, застосовуються метод послідовного рахунку і метод порозрядного врівноваження. Відповідно, розрізняють ЦВП послідовного рахунку і ЦВП порозрядного врівноваження (кодоімпульсивний).

Залежно від того, яке значення величини вимірюється, ЦВП діляться на прилади для вимірювання миттєвого значення та прилади для вимірювання середнього значення за певний проміжок часу (інтегрують).

За родом вимірюваної величини ЦВП підрозділяються на:

- вольтметри,
- омметри,
- частотоміри,
- фазометри,
- мультиметри (комбіновані), в яких передбачається можливість вимірювання декількох електричних величин та ряду параметрів електричних ланцюгів.

По області застосування виділяються ЦВП лабораторні, *системні та щитові*.

ЦПП влаштовані складно, їх функціональні частини виконуються на основі елементів електронної техніки, в основному це інтегральні мікросхеми. У сучасних ЦВП функціональні вузли, що *перетворюють аналогові сигнали*, зазвичай виконуються на основі мікроелектронних операційних підсилювачів.

Розглянемо спрощено найбільш часто застосовані вузли.

Тригери складаються з пристрою з двома станами стійкої рівноваги, здатними стрибкоподібно переходити з одного стану в інший за допомогою зовнішнього сигналу. Після такого переходу новий стійкий стан зберігається до тих пір, поки інший зовнішній сигнал не змінить його.

Перерахункові пристрої (ПП) застосовуються для виконання різних завдань, наприклад, для поділу частоти імпульсів, для перетворення число-імпульсного коду в двійковий і т.д.

Якщо ПП забезпечити ВП для відображення номера стану схеми, то можна вести рахунок надходять на вхід ПУ імпульсів, тобто в цьому випадку можна отримати лічильник імпульсів

Знакові індикатори застосовуються для отримання свідчень в цифровій формі у вигляді спеціальних газорозрядних ламп або сегментних знакових індикаторів (як світяться елементів використовують рідкі кристали, світлодіоди, смужки електролюмінафора тощо),

Ключі – це пристрої, що виконують функції вимикачів і перемикачів. В основному застосовуються електронні ключі на діодах, транзисторах, та інших елементах електронних схем.

Логічні елементи реалізують логічні функції. Вхідними та вихідними величинами цих елементів є змінні, що приймають тільки два значення –1 і 0.

Розглянемо основні логічні елементи, що дають можливість шляхом їх з'єднання реалізувати будь-яку логічну функцію.

Логічний елемент АБО – функція додавання, має кілька входів і один вихід, який приймає значення 1, якщо хоча б одна вхідна величина дорівнює 1 і приймає значення 0, якщо всі входи рівні 0;

Логічний елемент НЕ – функція заперечення (якщо вхід має значення рівне 0, то на виході отримаємо 1 і навпаки) служить для інвертування;

Логічна функція І – функція множення, має кілька входів і один вихід, який приймає значення 1, якщо всі входи рівні 1 і приймає значення 0, якщо хоча б один вхід дорівнює 0. Елемент І носить назву схеми збігу і може застосовуватися як логічний ключ, один із вхідних сигналів якого служить керуючим.

Логічні елементи виконують як на дискретних пристроях (діодах, транзисторах, резисторах), так і у вигляді інтегральних мікросхем.

Дешифратори – це пристрої, для перетворення кодів одного виду в інші.

Порівнюють пристрої (СП) – призначені для порівняння відомої (X_1) і невідомою (X_2) величин і формування вихідного сигналу (Y , Y_1 , Y_2) залежно від результатів порівняння. Вихідний сигнал реальних СП змінює своє значення не в момент рівності невідомих ($X_1 = X_2$), а практично при деякій різниці $X_{\text{сеп}} = X_1 - X_2$, званої порогом чутливості, або порогом спрацьовування СП. Вхідний опір і швидкодія СП зазвичай визначають вхідний опір і швидкодія ЦВП. Реалізуються СП із застосуванням елементів електроніки.

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) призначені для перетворення коду в квантовану величину (напруги, опір і т.д.).

Ознайомимося з принципом дії деяких приладів.

Хронометри – прилади для вимірювання інтервалу часу. Спрощена структурна схема приладу приведена на рис. 10.1.

На початку циклу вимірювання імпульсом "Установка нуля" одночасно встановлюються в початковий стан всі елементи, які можуть мати неоднозначні стану.

При надходженні старт-імпульсу тригер Т перекидається і своїм вихідним сигналом відкриває ключ К. Імпульси від генератора імпульсів стабільної частоти (ГІСЧ) починають надходити на вхід ЦУ. В момент закінчення інтервалу t_x стоп-імпульс повертає Т в початковий стан, ключ К закривається, і на ВП фіксується число $N = t_x / T_0 = t_x f_0$.

Похибки таких приладів складаються з похибки квантування (чим менше відношення T_0/t_x , тим менше похибка); похибки, яка залежить від нестабільності частоти f_0 ; похибки, які отримані від неточності передачі тимчасового інтервалу на ключ, наприклад, у мілісекундомера типу Ф209, основна похибка якого складе $\pm [0,005 + 0,005 (t_x / t_{x-1})]\%$.

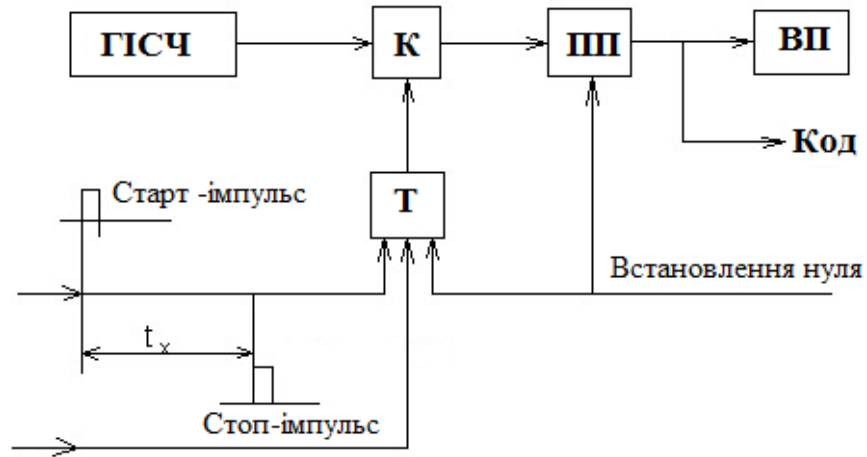


Рис. 10.1. Спрощена структурна схема приладу

Розглянута структурна схема лежить в основі ЦВП, призначених для вимірювання фази, частоти, напруги. Кут фазового зсуву між напругою фазометру легко перетворюється в тимчасовий інтервал. Тому схема фазометру відрізняється від хронометру формувачами Φ , що формують старт і стоп-імпульси в моменти переходу кривих напруг через нуль, і блоком виділення тимчасового інтервалу, який із серії виділяє два імпульсу. Проміжок між двома імпульсами вимірюється часовим інтервалом t_x .

Складові похибки у фазометрів ті ж, що і у хронометрів. **Частотоміри.** Принцип дії приладу (рис. 10.2) заснований на підрахунку імпульсів частотою f_x за інтервал часу $t_{ін}$.

Генератор імпульсів заданої тривалості ГІЗД через тригер Т відкриває ключ К на час $t_{ін}$. За цей час імпульси частотою f_x , сформовані формувачем Φ , пройдуть на вхід перерахункових пристрої ПП в кількості $N = t_{ін} / T_x = t_{ін} f_x$. Похибки приладу складаються з похибки квантування, яка залежить від $T_x / t_{ін}$; похибки, отриманої від неточності формування $t_{ін}$.

Наприклад, частотомер типу Ф5041, призначений для вимірювання частоти від 0,1 Гц до 10 МГц, періодів в діапазоні частот від 0,1 Гц до 1 МГц, тривалості електричних імпульсів від 1 мкс до 1с, інтервалів часу від 10 мкс до 104 с, відносини частот від 1: 1 до 10б: 1 для рахунку електричних імпульсів.

Похибка вимірювання частоти $\delta = \pm [107 + 1 / t_x / t_{ин}] \cdot 100\%$.

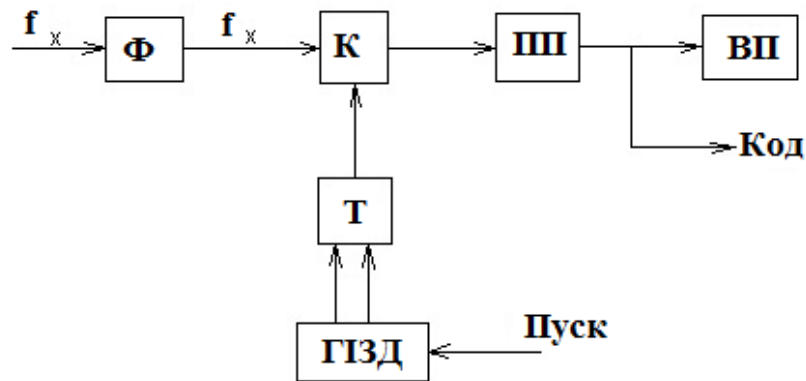


Рис. 10.2. Спрощена структурна схема частотоміру

Вольтметри. Характеристики цифрових вольтметрів (ЦВ) залежать від методу перетворення (зміни), реалізації за схемою параметрів елементної бази, конструкції, технології виготовлення та інших факторів.

Ці фактори є залежними величинами і в сукупності і взаємозв'язку визначають властивості конкретних приладів. В основу принципу роботи покладено компенсаційний метод вимірювання, при якому невідома напруга порівнюється з відомою – компенсуючою.

Момент рівності цих напруг виявляється порівнює схемою, а цифровий відліковий пристрій реєструє напругу для цього моменту часу. Таким чином, основним вузлом будь-якого ЦВ є пристрій для перетворення вимірюваної напруги у відповідні цифрові відліки.

Способів виконання подібної, операції в даний час відомо дуже багато. Наприклад, імпульсних вольтметрах (рис.10.3) вимірюється напруга U_x , яка попередньо перетворюється в часовий інтервал t_x шляхом порівняння U_x з лінійно-змінюється напругою U_k .

При запуску приладу за допомогою старт-імпульсу в момент t_1 спрацьовує тригер Т, який відкриває ключ К і запускає генератор лінійно-вимірюють напругу ГЛВН.

Напруга U_k , на виході ГЛВН починає змінюватися за лінійним законом, а на вхід ПП подаються Квант-імпульси. У момент t_2 при $u_k = u_x$ порівнюючий пристрій ПП за допомогою стоп-імпульсу через Т і К припиняє подачу імпульсів в ПП. Тобто за час $t_x = t_2 - t_1 = U_x / k$

Де значення k – коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни напруги (u_k) на вхід ПП пройде число імпульсів $N = t_x T_0 = U_x f_0 / k$.

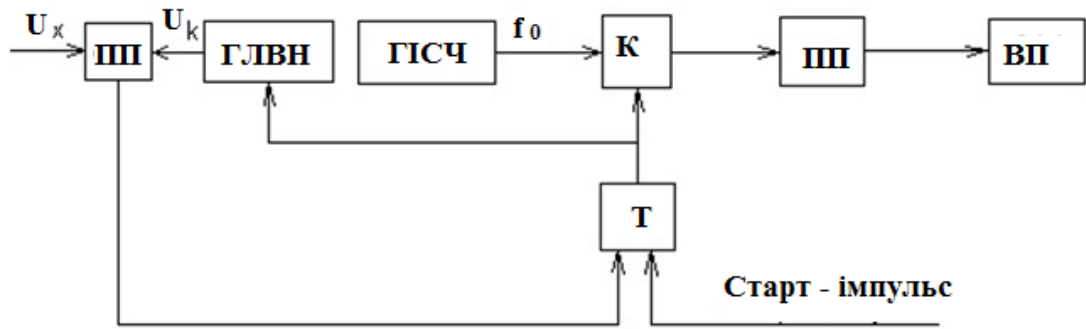


Рис. 10.3. Спрощена структурна схема вольметра

ЦВ широко поширені, їх відрізняють висока точність і швидкість дії, а також можливість отримання результату вимірювання безпосередньо у вигляді числа і повної відсутності суб'єктивних похибок.

Запитання для самоконтролю до теми 10

1. В чому переваги та недоліки застосування цифрових вимірювальних приладів?
2. Навести класифікацію цифрових вимірювальних приладів.

Тема 11. Вимірювання неелектричних величин

План

11.1 Поняття про вимірювання неелектричних величин

11.2. Принцип роботи

11.1. Поняття про вимірювання неелектричних величин

Електровимірювальна техніка в порівнянні з іншими видами вимірювальних пристроїв володіє більшою надійністю, точністю, дешевизною і простотою. З цих причин електровимірювальні прилади широко застосовують для вимірювання неелектричних величин.

Основними частинами електричної системи, що служить для вимірювання неелектричних величин, є перетворювач (датчик), проміжні пристрої і індикатор. Сутність електричних вимірювань неелектричних величин полягає в тому, що датчик перетворює неелектричну величину, наприклад зміна рівня рідини, температури, швидкості руху і т. П., В зміна електричної величини опору, струму або напруги, яка вимірюється індикатором, що представляє собою звичайний електровимірювальні прилади.

11.2. Принцип роботи

Розглянемо пристрій деяких електричних датчиків і приклади їх застосування для електричних вимірювань неелектричних величин. Реостатний датчик (рис. 11.1) являє собою вигнуту (або пряму) пластину 1 з ізоляційного матеріалу, на яку намотана дрот 4 з матеріалу з великим питомим опором. При повороті осі 2 рухливий контакт - щітка 3 датчика переміщається по дроту, в результаті чого змінюється її опір, що відповідно впливає на показання приладу електровимірювання.

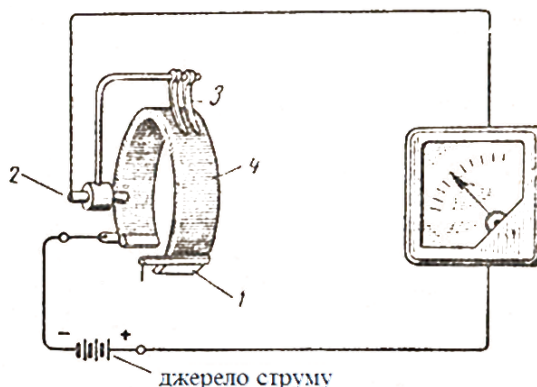


Рис. 11.1. Схема принципу дії реостатного датчика: 1 –пластина, 2 – вісь, 3 – щітка, 4 – дрот

Реостатний датчик використовується для вимірювання рівня рідини в баку.

Дія приладу, призначеного для визначення кількості рідини в баку (рис. 11.2), засноване на використанні реостатного датчика, опір якого змінюється при підвищенні або зниженні рівня рідини.

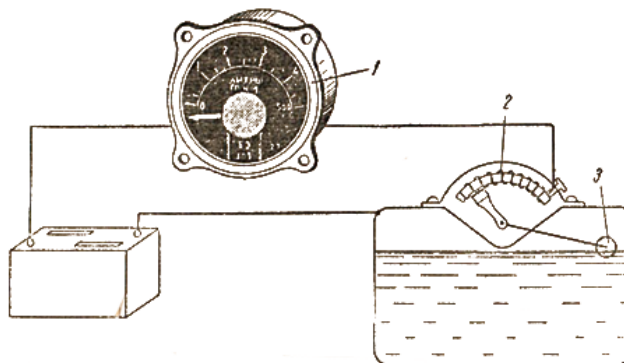


Рис. 11.2. Схема приладу для вимірювання рівня рідини

Цей прилад складається з датчика 2 і індикатора 1. Повзунок датчика через систему важелів скріплений з поплавком 3, що знаходяться на поверхні рідини в баку. Індикатором служить прилад магнітоелектричної системи, шкала якого проградуєрована в літрах.

Коли в баку багато рідини, поплавок переміщується вгору. Разом з ним пересувається щітка датчика, опір якого зменшується. Струм в ланцюзі зростає і стрілка індикатора відхиляється на великий кут, вказуючи за шкалою кількість рідини. При опусканні поплавка опір датчика збільшується, струм у ланцюзі стає менше і стрілка приладу відхиляється вліво, вказуючи, що в баку мало рідини.

Електроконтактні датчики служать для перетворення механічного переміщення вимірювального штока, що стикається з поверхнею контрольованого об'єкта, в замикання або розмикання електричного кола. Найбільш простим електроконтактним датчиком є датчик, який має одну пару контактів. Датчики з кількома парами контактів можуть одночасно контролювати декілька різних об'єктів.

На рис. 11.3 наведена схема пристрою і дії електроконтактного датчика, використовуваного для вимірювання розмірів деталей. Вимірювальний шток 1 під дією пружини 2 прагне висунутися з корпусу датчика вниз.

Якщо геометричний розмір контрольованої деталі 3 більше заданого, вимірювальний шток піднімається, розмикає контакт 4 і замикає контакт 5.

При знаходженні під штоком виробу з розміром менше заданої величини контакт 5 розмикається і замикається контакт 4. При нормальному розмірі контрольованої деталі контакти 4 і 5 залишаються розімкнутими. До датчику можна приєднати електровимірні прилади. Відхилення стрілки одного приладу відповідає більшому розміру деталі, а іншого - меншому розміру. Положення стрілок у нульового розподілу означає, що під щупом датчика проходять деталі заданих розмірів.

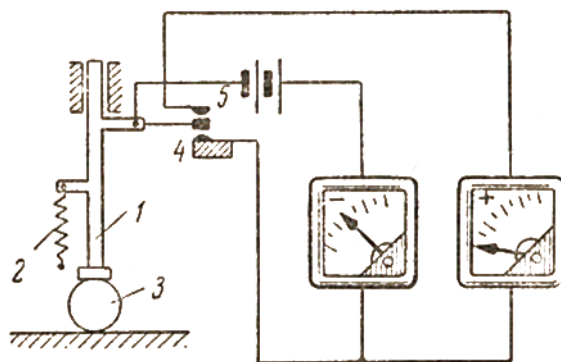


Рис. 11.3. Схема пристрою та дії електроконтактного датчика: 1 – вимірний шток, 2 – пружина, 3 – деталь, 4,5 – контакти

Замість приладів можна підключити до датчика електромагнітні лічильники, за допомогою яких враховується кількість деталей шлюбу - більшого і меншого розмірів.

Лічильники можна замінити різнокольоровими сигнальними лампами. Індукційні датчики перетворюють неелектричні величини в е. р. с., яка вимірюється приладом.

В індукційному датчику (рис. 11.4) котушка 1, поміщена на осерді 2, переміщається в зазорі постійного магніту 3 (або електромагніту) і в ній індукується е. р. с.

Для автоматичного контролю розмірів деталі в процесі її обробки на верстаті застосовують віброконтактний прилад з індукційним датчиком. Він дозволяє значно збільшити продуктивність верстатів, полегшує працю робітників, різко скорочує брак.

Схема пристрою віброконтактного приладу приведена на рис. 11.5. Розміри оброблюваної деталі контролюються датчиком-щупом 6, виконаним у вигляді важеля. Щуп притискається до деталі 8 під дією плоскої пружини 5. Коли по електромагніту 4 пропускають змінний струм, виступ щупа то притягається до сердечника цього електромагніту, то відходить від нього. При цьому щуп отримує коливальні рухи по вертикалі (100 разів на секунду).

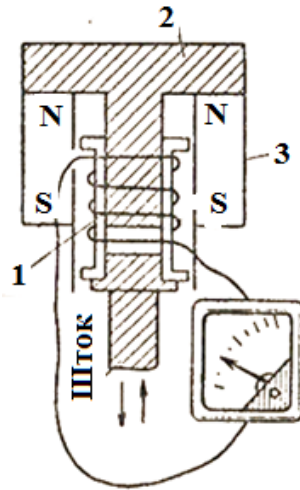


Рис. 11.4. Схема будови індукційного датчика: 1 – котушка, 2 – стрижень, 3 – постійний магніт

Верхній кінець щупа з'єднаний з намагніченим від постійного магніту 2 сердечником 3 другого електромагніту, обмотка якого з'єднана з електровимірюваним приладом – індикатором 1. Шкала індикатора відградуїрована в міліметрах.

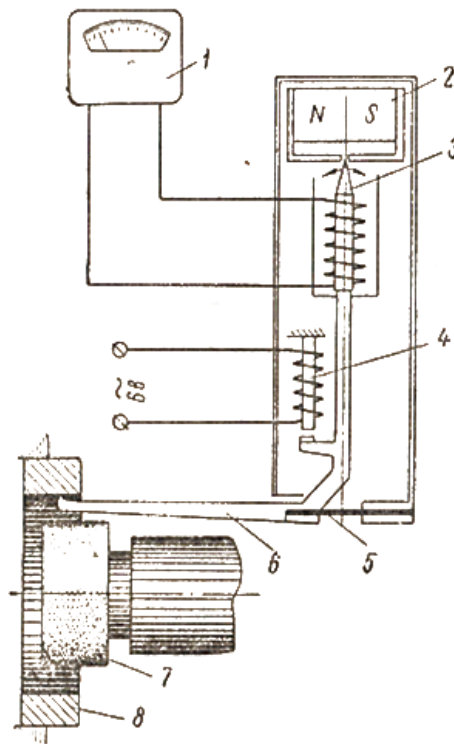


Рис.11.5. Схема пристрою віброконтактного приладу для автоматичного контролю розмірів деталі

При коливаннях щупа магнітне поле сердечника 3 перетинає витки електромагніту і в ній індукується е.р.с., під дією якої по обмотці

вимірювального приладу починає проходити струм. Коли щуп підводять до оброблюваної деталі, його робоча частина вдаряє об її поверхню. У міру обробки деталі розмах коливань щупа змінюється, а разом з цим змінюються індукована в електромагніті е. р. с. і сила струму в індикаторі. За положенням стрілки на шкалі індикатора робочий стежить за розміром оброблюваної деталі.

Такий прилад може працювати автоматично і в момент досягнення заданого розміру через спеціальний пристрій зупинити верстат.

Для вимірювання швидкості обертання валу застосовують електричні тахометри. Вони складаються з індукційного датчика і індикатора. Датчик являє собою маленький генератор електричної енергії. Напруга, що дається цим генератором, змінюється пропорційно швидкості обертання його осі. До затискачів датчика приєднується індикатор - вольтметр, шкала якого відградуїрована в одиницях швидкості.

Щоб визначити швидкість обертання валу машини, вісь датчика з'єднують з валом за допомогою зубчастої або іншої передачі. В обмотці датчика виникає індукція та е. р. с., пропорційна швидкості обертання валу. Її величину показує стрілка на шкалі приладу.

Для вимірювання температури використовується залежність величини е.р.с. термопари від температури нагріву місця її спаю.

На рис.11.6 показаний термоелектричний вимірювач температури. Він складається з датчика 1 у вигляді термопари і індикатора 2 - електровимірювального приладу, шкала якого відградуїована в градусах температури. Цим приладом можна вимірювати температуру, наприклад, в межах від 0 до 100 ° С.

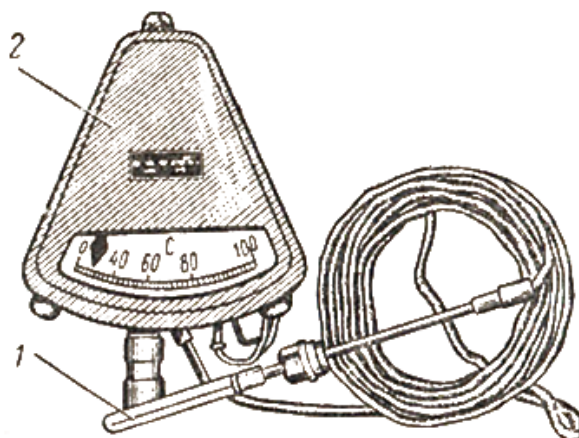


Рис. 11.6 Термоелектричний вимірювач температури: 1 – датчик, 2 – індикатор

На рис. 11.7 показана схема використання п'єзоелектричного датчика для вимірювання тиску.

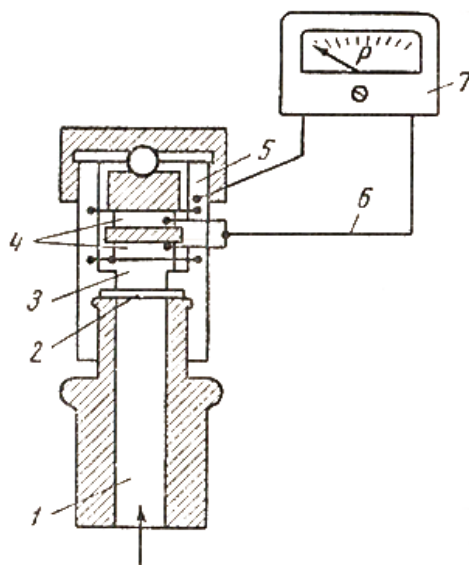


Рис. 11.7. П'єзоелектричний манометр: 1 – трубка, 2 – мембрана, 3 – шайба, 4 – пластина, 5 – корпус, 6 – електрод, 7 – електровимірювальний прилад

Через трубку 1 п'єзоелектричного манометра пар, тиск якого необхідно виміряти, впливає на мембрану 2 і через шайбу 3 передається на дві пластинки 4 п'єзоелектрика з кварцу. При стисненні кварцу на його кінцях, з'єднаних з електродом 6, з'являється негативний електричний заряд, а на протилежних кінцях кварцових пластинок, з'єднаних з корпусом 5, – позитивний заряд. Електрод 6 і корпус 5 манометра провідниками з'єднуються з індикатором – електровимірювальним приладом 7, шкала якого відградує в одиницях вимірювання тиску.

Цей прилад вимірює величину зарядів, що виникають на кварцових пластинках, а отже, і тиск.

П'єзоелектричні манометри придатні для вимірювання великих і дуже малих тисків. Це пов'язано з тим, що мізерно мала кількість електрики, що з'являється на кінцях п'єзоелектриків при досить малих тисках, можна подати на підсилювач, а потім виміряти електровимірювальним приладом.

Запитання для самоконтролю до теми 11

1. Якими приладами вимірюється сила струму, напруга і опір?
2. Назвіть переваги приладів електромагнітної системи.
3. На якому принципі заснована дія приладів магнітоелектричної системи?

4. Для чого до амперметра підключають шунт?
5. За якою формулою можна обчислити величину додаткового опору, який приєднується до вольтметра?
6. Якими приладами вимірюють витрата електричної енергії?
7. Для чого служать датчики?
8. Зобразіть схему включення ваттметра.
9. За якою формулою обчислюється невідоме опір, виміряний мостом, при його електричному рівновазі?

Тема 12. Вимірювання температури

План

- 12.1 Методи вимірювання температури і види температурних шкал
- 12.2 Класифікація приладів для вимірювання температури
- 12.3 Ртутні термометри
- 12.4 Дилатометричні термометри
- 12.5 Манометричні термометри
- 12.6 Термоелектричні термометри
- 12.7 Термометри опору
- 12.8 Пірометри
- 12.9 Тепловізори

В енергетичних установках і системах теплотехнічні вимірювання служать для безперервного виробничого контролю за роботою устаткування. При проведенні робіт з енергетичного аудиту різних систем, у яких основним об'єктивним показником відповідності їх експлуатаційних характеристик з нормативними вимогами або вимогами технологічних умов є температура, точність її вимірювання буде обумовлювати прийнятність подальших заходів щодо впровадження енергозберігаючих заходів. Як правило, величина температури найбільш значуща в системах з потужними енергетичними потоками, в яких головним чином проводяться вимірювання ряду основних величин (тиску, температури, витрати та ін.) таких робочих речовин:

- свіжої пари, перегрітої пари, відібраної і відпрацьованої пари;
- води живильної, охолодженої, хімічно очищеної, мережевої і конденсату;
- димових газів у топці і газоходах котлоагрегату;
- повітря атмосферного, а також повітря для охолодження турбогенератора;
- насосів, вентиляторів, димососів і в системах перетворення енергій;
- палива твердого, рідкого і газоподібного.

Температурою називається ступінь нагріву речовини. Це ствердження про температуру засновано на теплообміні між двома тілами, що перебувають у тепловому контакті. Тіло, більше нагріте, що віддає тепло, має і більш високу температуру, ніж тіло, що сприймає тепло. За відсутності

передачі тепла від одного тіла до іншого, тобто в стані теплової рівноваги, температури тіл рівні.

Головним завданням інженера (інженера-енергоменеджера), що проводить температурні вимірювання, є подальше забезпечення надійної і раціональної експлуатації обстежуваної енергосистеми. Успішне виконання цього завдання, а також організація технічного обліку роботи устаткування неможливі без енергетичного контролю, здійснюваного за допомогою вимірювальних приладів різного призначення, що дозволяє забезпечити:

- надійну і безпечну експлуатацію енергетичних установок;
- економічно найвигідніший режим роботи устаткування;
- організацію технічного обліку роботи агрегатів у цілому.

12.1. Методи вимірювання температури і види температурних шкал

Виміряти температуру певного тіла безпосередньо, тобто так, як вимірюють інші фізичні величини, наприклад довжину, масу, об'єм або час, не є можливим, тому що в природі не існує еталона або зразка одиниці цієї величини. Тому визначення температури речовини роблять за допомогою спостереження за зміною фізичних властивостей іншої, так званої термометричної речовини, яка зіткнулася з нагрітим тілом, вступає з ним через деякий час у теплову рівновагу. Такий метод вимірювання дає не абсолютне значення температури нагрітого середовища, а лише різницю щодо вихідної температури робочої речовини, умовно прийнятої за нуль.

Внаслідок зміни при нагріванні внутрішньої енергії речовини практично всі фізичні властивості останнього більшою або меншою мірою залежать від температури, але для її вимірювання вибираються по можливості ті з них, які однозначно міняються зі зміною температури, не піддані впливу інших факторів і порівняно легко вимірюються. Цим вимогам найбільше повно відповідають такі властивості робочих речовин, як об'ємне розширення, зміна тиску в замкнутому об'ємі, зміна електричного опору, виникнення термоелектрорушійної сили та інтенсивність випромінювання, покладені в основу будови приладів для вимірювання температури.

Зміна агрегатного стану хімічно чистої речовини (плавлення або затвердіння, кипіння або конденсація), як відомо, проходить при постійній температурі, значення якої визначаються складом речовини, характером її агрегатної зміни і тиском. Значення цих відтворених температур рівноваги

між твердою і рідкою або рідкою і газоподібною фазами різних речовин при нормальному атмосферному тиску, що дорівнює 101325 Па (760 мм рт. ст.), називаються *реперними точками*.

Якщо взяти за основу інтервал температур між реперними точками плавлення льоду і кипіння води, позначивши їх відповідно 0 і 100, у межах цих температур виміряти об'ємне розширення певної робочої речовини, наприклад ртуті, що перебуває у вузькій циліндричній скляній посудині, і розділити на 100 рівних частин зміну висоти її стовпа, то в результаті буде побудована так звана температурна шкала.

Для вимірювання температури, що лежить вище або нижче обраних значень реперних точок, отримані поділки наносять на шкалі і за межами відміток 0 і 100. Поділки температурної шкали називаються градусами.

При побудові зазначеної температурної шкали була довільно взята пропорційна залежність об'ємного розширення ртуті від температури, що, однак, не відповідає дійсності, особливо при температурах вище 100 градусів. Тому за допомогою такої шкали можна точно виміряти температуру тільки у двох вихідних точках 0 і 100 градусів, тоді як результати вимірювання у всьому іншому діапазоні шкали будуть неточними. Те саме явище спостерігалось б і при побудові температурної шкали з використанням інших фізичних властивостей робочої речовини, таких, як зміна електричного опору провідника, збудження термоелектрорушійної сили і т.п.

Користуючись другим законом термодинаміки, англійський фізик Кельвін у 1848 р. запропонував дуже точну і рівномірну, що не залежить від властивостей робочої речовини шкалу, яка отримала назву термодинамічної температурної шкали (шкали Кельвіна). Остання заснована на рівнянні термодинаміки для оборотного процесу (циклу Карно).

Термодинамічна температурна шкала починається з абсолютного нуля і у цей час є основною. Одиниці термодинамічної температури позначаються знаком K (кельвін), а умовне значення її буквою T .

На Генеральній конференції по мірах і вагах Міжнародний комітет мір і ваг прийняв нову практичну температурну шкалу 1968 р. (МПТШ-68), градуси якої позначаються знаком $^{\circ}C$ (градус Цельсія), а умовне значення температури – буквою t . Для цієї шкали градус Цельсія дорівнює градусу Кельвіна.

Крім Міжнародної практичної температурної шкали, існує ще шкала Фаренгейта, запропонована у 1715 р. Шкала побудована шляхом поділу

інтервалу між реперними точками плавлення льоду і кипіння води на 180 рівних частин (градусів), позначуваних знаком $^{\circ}\Phi$. За цією шкалою точка плавлення льоду дорівнює 32, а кипіння води $212^{\circ}\Phi$.

Для перерахування температури, вираженої в кельвінах або градусах Фаренгейта, у градуси Цельсія користуються рівнянням

$$t^{\circ}C = T K - 273,15 = 0,556 (n^{\circ}\Phi - 32), \quad (12.1)$$

де $n^{\circ}\Phi$ – число градусів за шкалою Фаренгейта.

12.2. Класифікація приладів для вимірювання температури

Прилади для вимірювання температури поділяють залежно від використовуваних ними фізичних властивостей речовин на такі групи з діапазоном показань:

Термометри розширення ($-190\dots+650^{\circ}C$) засновані на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм.

Манометричні термометри ($-160\dots+200^{\circ}C$) працюють за принципом зміни тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкнутому об'ємі при нагріванні або охолодженні цих речовин.

Термометри опору ($-200\dots+650^{\circ}C$) засновані на властивості металевих провідників змінювати залежно від нагрівання їх електричний опір.

Термоелектричні термометри ($-50\dots+1800^{\circ}C$) побудовані на властивості різнорідних металів і сплавів утворювати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу, що залежить від температури спаю.

Пірометри ($-30\dots+6000^{\circ}C$) працюють за принципом вимірювання випромінюваної нагрітими тілами енергії, що залежить від температури цих тіл.

Термометри розширення. Фізична властивість тіл змінювати свій об'єм залежно від нагрівання широко використовується для вимірювання температури. На цьому принципі заснований пристрій *рідинних скляних і дилатометричних* термометрів, які з'явилися дуже давно і послужили для створення перших температурних шкал.

У *рідинних термометрах*, побудованих на принципі теплового розширення рідини в скляному резервуарі, як робочі речовини використовуються ртуть і органічні рідини – етиловий спирт, толуол і ін.

Найбільш широкого застосування дістали ртутні термометри, що мають у порівнянні з термометрами, заповненими органічними рідинами, істотні переваги: великий діапазон вимірювання температури, при якому

ртуть залишається рідкою, не змочення скла ртуттю, можливість заповнення термометра хімічно чистою ртуттю через легкість її одержання та ін. При нормальному атмосферному тиску ртуть перебуває в рідкому стані при температурах від -39 (точка замерзання) до 357°C (точка кипіння) і середній температурний коефіцієнт об'ємного розширення $0,18 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

Термометри з органічними рідинами здебільшого придатні лише для вимірювання низьких температур у межах до 100°C .

Рідинні термометри, виготовлені зі скла, є місцевими показуючими приладами. Вони складаються з резервуара з рідиною, капілярної трубки, приєднаної до резервуара і закритої із протилежного кінця, шкали і захисної оболонки.

12.3. Ртутні термометри

Ртутні термометри за призначенням поділяють на *промислові (технічні), лабораторні і зразкові*. Основна похибка ртутних термометрів залежить від діапазону показань і ціни поділки шкали, зі збільшенням яких вона зростає. Внаслідок невеликого відхилення видимого коефіцієнта розширення ртуті в склі при зміні температури ртутні термометри мають майже рівномірну шкалу. Ртутні термометри виготовляються двох видів: із вкладеною шкалою і паличні (рис. 12.1).

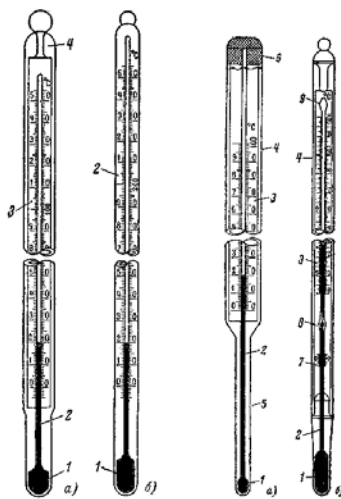


Рис. 12.1 - Ртутні термометри: а- з вкладеною шкалою; б – паличний

Термометр із вкладеною шкалою має заповнений ртуттю резервуар 1 (рис.12.1 а), капілярну трубку 2, циферблат 3 з молочного скла зі шкалою і зовнішньою циліндричною оболонкою 4, у якій укріплені капіляр і циферблат. Зовнішня оболонка з одного кінця щільно закрита, а з іншого - припаяна до резервуара.

Паличний термометр складається з резервуара 1 (рис.12.1 б), з'єданого з товстостінним капіляром 2 зовнішнім діаметром 6-8 мм. Шкала термометра нанесена безпосередньо на поверхні капіляра у вигляді насічки на склі. Паличні термометри є більш точними в порівнянні з термометрами із вкладеною шкалою.

Недоліками ртутних термометрів є їх крихкість, неможливість дистанційної передачі і автоматичного запису показань, більша інерційність і труднощі відліку через нечіткість шкали і поганої видимості ртуті в капілярі. Все це значною мірою обмежує їх застосування, залишаючи за ними головним чином область місцевого контролю і лабораторні вимірювання.

Точність показань ртутного термометра, як і будь-якого приладу, що вимірює температуру, залежить від способу його устанавлення, тобто від правильного вирішення питань, пов'язаних із теплообміном між вимірюваною речовиною, термометром і зовнішнім середовищем. Це завдання зводиться до двох основних вимог: по-перше, до забезпечення найбільш сприятливих умов передачі тепла від вимірюваного середовища чутливої частини (резервуара) термометра і, по-друге, до зменшення по можливості віддачі тепла приладом навколишньому повітрю.

Особливо значно впливає на точність вимірювання витікання тепла від термометра, що при рідкому вимірюваному середовищі визначається теплопровідністю частин приладу, а при газовій і паровій - ще додатковим обміном тепла випромінюванням з навколишніми поверхнями. Крім того, уведена у вимірюване середовище чутлива частина приладу тією чи іншою мірою змінює навколишнє температурне поле внаслідок відведення тепла. У цих умовах вимірювання температури не дає правильних результатів, тому що показання приладу відповідають його власній температурі, що відрізняється від температури вимірювального середовища. Неправильне устанавлення термометра, що дає більшу втрату тепла в навколишнє середовище, може привести до заниження його показань на 10-15%.

Розглянуті нижче способи устанавлення ртутних термометрів є в основному загальними для різних типів термометрів.

Застосовуються два способи устанавлення ртутних термометрів: у захисних оправах (або гільзах) і шляхом безпосереднього занурення термометрів у вимірювальне середовище.

Досить поширеним є устанавлення термометра в захисній гільзі (рис.12.2), що оберігає його від поломки і забезпечує необхідну щільність

з'єднання у місці розміщення приладу. Довжина захисної гільзи вибирається залежно від необхідної глибини занурення термометра. Для поліпшення теплопередачі від гільзи до резервуара термометра кільцевий зазор, що утвориться в гільзі, між резервуаром та її стінкою заповнюється при вимірюванні температури до 150°C машинним маслом, а при більш високій температурі - мідною стружкою. Заповнення гільзи маслом або стружкою проводиться так, щоб у це середовище був занурений тільки резервуар термометра. Надмірне заповнення гільзи знижує точність вимірювання через зростання відтоку тепла і збільшує інерційність приладу.

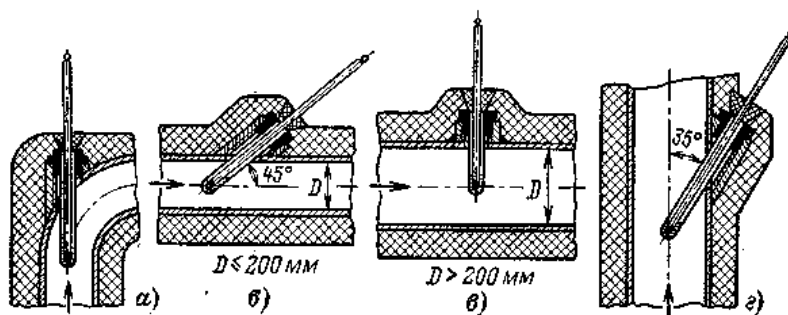


Рис. 12.2 Установлення ртутного термометра у захисній гільзі

При вимірюванні температури в трубопроводі термометр установлюється в положення, при якому вісь труби проходить посередині резервуара. Занурення кінця термометра до центра труби, тобто в зону найбільшої швидкості потоку, поліпшує теплообмін між середовищем, що рухається.

Найбільш правильним є установлення термометра уздовж осі трубопроводу на коліні з висхідним потоком (рис.12.2 а), тому що при цьому умови обтікання кінця гільзи досить сприятливі. На горизонтальному трубопроводі діаметром до 200 мм термометр установлюється похило до осі труби, назустріч потоку (рис.12.2 б). При діаметрі трубопроводу більше 200 мм термометр може бути розміщений за нормаллю до осі труби (рис.12.2 в). На прямій вертикальній ділянці трубопроводу з висхідним потоком термометр завжди встановлюється похило, назустріч потоку (рис.12.2 г). Установлювати термометри на вертикальних трубопроводах зі спадним потоком не рекомендується.

12.4. Дилатометричні термометри

До дилатометричних термометрів відносять *стрижневі* і *пластинчастий* (біметалічний) термометри, дія яких заснована на

відносному подовженні під впливом температури двох твердих тіл, що мають різні температурні коефіцієнти лінійного розширення.

Стрижневий термометр (рис.12.3 а) має закрити з одного кінця трубку 1, що розміщується у вимірювальному середовищі і виготовлена з матеріалу з більшим коефіцієнтом лінійного розширення. У трубку вставлений стрижень 2, що притискається до її дна важелем 3, з'єднаним із пружиною 4. Стрижень виготовлений з матеріалу з малим коефіцієнтом розширення. При зміні температури трубка змінює свою довжину, що приводить до переміщення в ній стрижня, який зберігає майже постійні розміри і з'єднаний за допомогою важеля 3 із вказівною стрілкою приладу.

Пластинчастий термометр (рис.12.3 б) складається із двох вигнутих і спаяних між собою по краях металевих смужок, з яких смужка 1 має великий коефіцієнт лінійного розширення, а смужка 2 – малий. Отримана пластинка змінює залежно від температури ступінь свого вигину, величина якого за допомогою тяги 3, важеля 4 і з'єднаної з ним стрілки зазначається за шкалою приладу. При збільшенні температури пластинка вигинається у бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення.

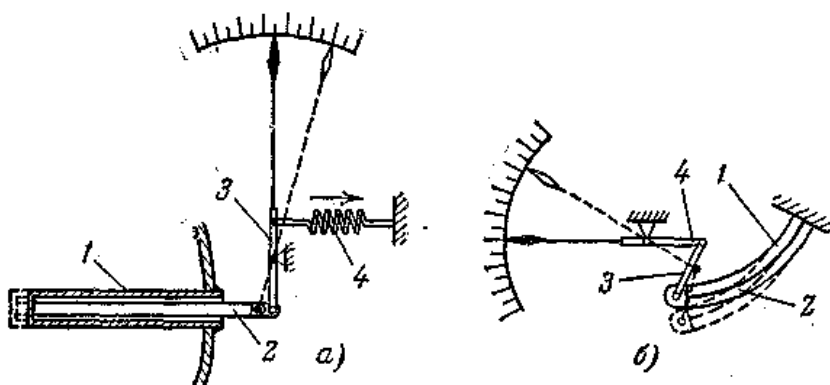


Рис. 12.3 - Дилатометричні термометри: а – стрижневий; б – пластинчастий

Дилатометричні термометри не дістали поширення як самостійні прилади, а використовуються головним чином як чутливі елементи в сигналізаторах температури. Крім того, пластинчасті термометри іноді застосовуються для компенсації впливу змінної температури навколишнього повітря на показання інших приладів, у які вони вбудовуються.

12.5. Манометричні термометри

Дія манометричних термометрів заснована на залежності тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкнутому об'ємі (термосистемі) від температури. Зазначені термометри є показуючими промисловими і самописними

приладами, призначеними для вимірювання температури в діапазоні до 200°C. Клас точності їх 1-2,5.

Залежно від робочої речовини, яка використовується в термосистемі, манометричні термометри поділяють на *газові*, *рідинні* і *конденсаційні* (мають як робочу речовину органічні рідини з низькою температурою кипіння: хлористий метил, ацетон і фреон). Вибір робочої речовини виконується виходячи із заданого діапазону показань і умов вимірювання.

Схема манометричного термометра, що показує, наведена на рис.12.4. Термосистема приладу, заповнена робочою речовиною, складається з термобалона 1, що занурюється у вимірювальне середовище, манометричної трубчастої пружини 2, що діє за допомогою тяги 3 на вказівну стрілку 4, і капіляра 5, що з'єднує пружину з термобалоном.

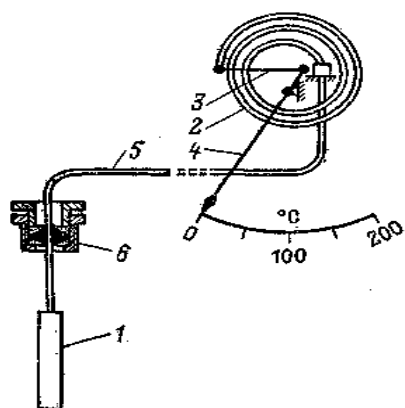


Рис.12.4. Схема манометричного показуючого термометра

Термобалон являє собою металеву трубку, закрити з одного кінця, а з іншого – з'єднани з капіляром. За допомогою знімного штуцера 6 з різьбленням і сальником термобалон установлюється в трубопроводах, баках і т.п. Можливе установлення його і у захисній гільзі. При нагріванні термобалона збільшення тиску робочої речовини передається через капіляр трубчастій пружині і приводить до розкручування останньої до того часу, доти діюче на неї зусилля, пропорційне різниці тисків у системі і навколишнім повітрі, не зрівноважується силою її пружної деформації.

12.6. Термоелектричні термометри

Дія термоелектричних термометрів заснована на властивості металів і сплавів створювати термоелектрорушійну силу (термоерс), що залежить від температури місця з'єднання (спаю) кінців двох різнорідних провідників (термоелектродів), що утворюють чутливий елемент термометра –

термопару. Маючи у своєму розпорядженні закон зміни термо-е.р.с. термометра від температури і визначаючи значення термо-е.р.с. електровимірювальним приладом, можна знайти реальне значення температури в місці вимірювання.

Термоелектричний термометр, що складається із двох спаяних і ізольованих по довжині термоелектродів, захисного чохла і головки із затискачами для підключення сполучної лінії, є первинним вимірювальним перетворювачем. Як вторинні прилади, що працюють із термоелектричними термометрами, застосовуються магнітоелектричні мілівольтметри і потенціометри.

Термоелектричні термометри широко застосовуються в енергетичних установках для вимірювання температури перегрітої пари, димових газів, металу труб котлоагрегатів і т.п. Позитивними властивостями їх є: великий діапазон вимірювання, висока чутливість, незначна інерційність, відсутність стороннього джерела електричного струму і легкість здійснення дистанційної передачі показань.

Для одержання порівняно високих значень термо-е.р.с. вибір термоелектродів проводиться таким чином, щоб у парі із платиною один з них створював позитивну, а інший - негативну термо-е.р.с.

Термоелектричні термометри, що набули практичного застосування, поділяють за матеріалами термоелектродів на дві групи: із благородних (платина, платинородій) і неблагородних металів або сплавів (хром-алюмель, хромель-копелевий сплав). Термометри типів ТПП і ТПР із термоелектродами із благородних металів і сплавів застосовуються головним чином для вимірювання температури вище 1000°C , тому що вони мають високу термостійкість. Незважаючи на відносно малі значення, що розвиває термо-е.р.с., термометри типу ТПП завдяки винятковій сталості термоелектричних властивостей і великому діапазону вимірювання дістали великого поширення головним чином як лабораторні, зразкові та еталонні.

Випускаються *одинарні* (з одним чутливим елементом) і *подвійні* (із двома чутливими елементами) термоелектричні термометри різних типів.

Подвійні термометри застосовуються для вимірювання температури в тому самому місці одночасно двома вторинними приладами, установленими в різних пунктах спостереження. Вони містять два однакових чутливих елементи, з'єднаних у загальні арматури. Термоелектроди ізольовані один від одного і знаходяться у захисному чохлі.

На рис.12.5 показано будову термометра типу ТПП. Термоелектроди, що утворюють робочий кінець (спай) 1, ізольовані по довжині порцеляновими трубками 2 і 3 і поміщені в захисний чохол 4, розрахований на атмосферний тиск. Для надання чохла додаткової міцності неробоча частина його вставлена в сталеву трубку 5. За допомогою сталевих втулок 6 і 7 захисний чохол з'єднаний з корпусом 8, у якому закріплені два затискачі 9 із припаяними до них термоелектродами, ущільненими мастикою 10. Корпус закритий знімною кришкою 11 на різьбленні, ущільненим прокладкою 12. Для уведення в корпус зовнішніх сполучних проводів служить штуцер 13 з ущільненням 14. На поверхні закріплена металева табличка 15, на якій зазначені: тип термометра, тиск, що допускається, і кінцева температура вимірюваного середовища, матеріал захисного чохла, дата виготовлення термометра і марка підприємства-виробника.

На точність вимірювання термоелектричного термометра значно впливають спосіб установлення і правильність проведення перевірки термометра і вторинного приладу.

Одним з основних вимог, які рекомендуються при установленні термоелектричного термометра, є досягнення мінімального витоку тепла по його арматурах. Для цього термометр можливо глибше занурюють у вимірювальне середовище, що приводить до збільшення теплосприймаючої поверхні і розташовується в місцях з великою швидкістю потоку, що поліпшує умови теплообміну.

12.7. Термометри опору

Для вимірювання температури широкого застосування дістали термометри опору, дія яких заснована на зміні електричного опору металевих провідників залежно від температури. Метали, як відомо, збільшують при нагріванні свій опір. Отже, знаючи залежність опору провідника від температури і визначаючи цей опір за допомогою електровимірювального приладу, можна робити висновки про температуру провідника.

Застосовуються *технічні* (промислові), *зразкові* та *еталонні платинові* термометри опору. Термометр опору, чутливий елемент якого складається з тонкого спірального дроту (обмотки), ізольованого і поміщеного в металевий захисний чохол з головкою для підключення з'єднувальних проводів, є первинним вимірювальним перетворювачем, який живиться від стороннього джерела струму.

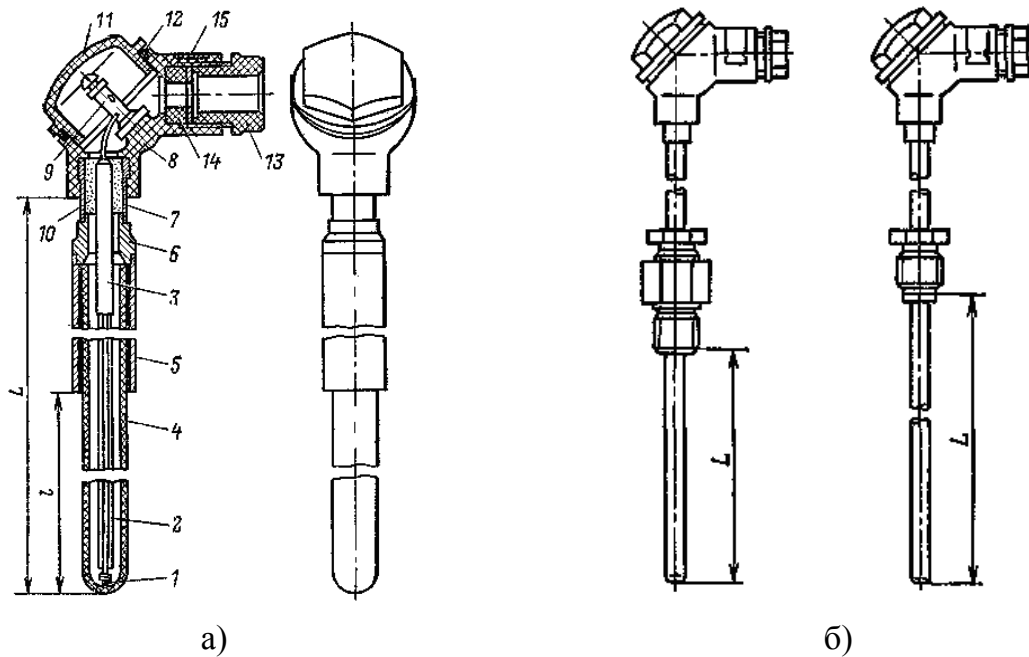


Рис. 12.5 - Термоелектричний термометр типу ТПІ (а) і ТХА (б)

Як вторинні прилади, що працюють із термометрами опору, застосовуються врівноважені і неуврівноважені вимірювальні мости і магнітоелектричні логометри.

Кінцева межа вимірювань дротових термометрів опору, обумовлена стійкістю їх при нагріванні, дорівнює 650°C .

Перевагами термометрів опору є висока точність вимірювання, можливість одержання приладів з безнульовою шкалою на вузький діапазон температур, легкість здійснення автоматичного запису і дистанційної передачі показань і можливість приєднання до одного вторинного приладу за допомогою перемикача декількох однотипних термометрів. До недоліків цих приладів відносять потребу в сторонньому джерелі струму.

12.8. Пірометри

Пірометри застосовуються для вимірювання температури тіл у діапазоні від мінус 30 до плюс 6000°C . Дія цих приладів заснована на залежності теплового випромінювання нагрітих тіл від їх температури і фізико-хімічних властивостей. На відміну від термометрів первинний перетворювач пірометра не підпадає під вплив високої температури і не змінює температурне поле, тому що перебуває поза вимірювальним середовищем.

З підвищенням температури нагрітого тіла інтенсивність його теплового випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини

швидко зростає. При нагріванні до 500°C тіло випромінює невидимі інфрачервоні промені великої довжини хвилі, однак подальше збільшення температури викликає появу видимих променів меншої довжини, завдяки яким тіло починає світитися. Спочатку розпечене тіло має темно-червоні кольори, у міру підвищення температури і появи променів, що поступово зменшуються за довжиною хвилі, переходить у червоний, жовтогарячий, жовтий і, нарешті, білі кольори, що складається з комплексу променів різної довжини хвилі.

Одночасно зі збільшенням температури нагрітого тіла і зміною його кольору сильно зростає інтенсивність часткового (монохроматичного або одноколірного) випромінювання (яскравість) для даної ефективної довжини хвилі, а також помітно збільшується інтенсивність сумарного випромінювання (радіація) тілом енергії, що дозволяє використовувати ці властивості для вимірювання температури нагрітих тіл.

Різні фізичні тіла, що нагріті до тієї самої температури, мають неоднакові часткову і сумарну інтенсивності випромінювання і мають різні коефіцієнти поглинання, що являє собою відношення енергії, поглиненої тілом, до енергії, що падає на тіло.

Найбільшу здатність випромінювання і поглинання енергії має так зване *абсолютно чорне тіло*, у природі не існуюче, що становить собою уявлюваний ідеальний випромінювач. Це тіло поглинає всі падаючі на нього промені, тобто має коефіцієнт поглинання, що дорівнює одиниці, і має найбільшу інтенсивність випромінювання.

Фізичні тіла мають здатність відбивати частину падаючих на них променів і, отже, завжди мають коефіцієнт поглинання менше одиниці. Інтенсивність випромінювання і коефіцієнт поглинання при даній температурі залежать від складу речовини і стану його поверхні. Тіло, що має темну і шорсткувату поверхню, ближче за своїми властивостями до чорного тіла, ніж тіло зі світлою і полірованою поверхнею.

Внаслідок цього шкалу пірометра доводиться градуювати за випромінюванням чорного тіла, тому що випромінювальна здатність реальних тіл менша, ніж чорних тіл, то показання пірометра будуть відповідати не дійсній температурі реального тіла, а дають умовну температуру або у цьому випадку так звану температуру яскравості. Пірометри, що вимірюють температуру яскравості за спектральною яскравістю у видимій частині спектра, називають *оптичними (квазімонохроматичними) візуальними пірометрами і фотоелектричними*.

Прилади, що вимірюють температуру за значенням відношень енергетичних яскравостей у двох спектральних інтервалах, називають *колірними пірометрами*, або *пірометрами спектрального відношення*.

Оптичні пірометри широко застосовуються в лабораторних і виробничих умовах для вимірювання температур вище 800°C . Принцип дії оптичних пірометрів заснований на порівнянні спектральної яскравості тіла зі спектральною яскравістю градуйованого джерела випромінювання. Як чутливий елемент, що визначає збіг спектральних яскравостей у візуальних оптичних пірометрах, служать очі людини. Найпоширенішим є оптичний пірометр зі зникаючою ниткою, схема якого наведена на рис.12.6 а. Для вимірювання температури об'єктів приладу спрямовується на об'єкт вимірювання *OB* так, щоб спостерігач на його фоні побачив в окулярі 7 нитку оптичної лампи 4.

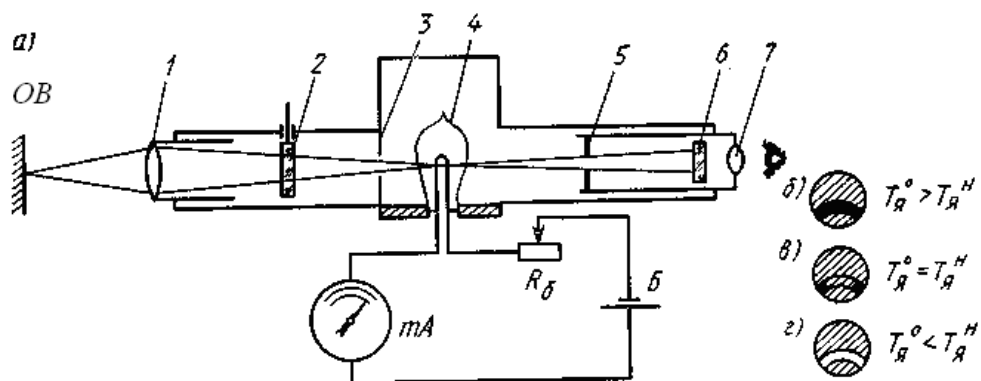


Рис. 12.6. Схема візуального оптичного пірометра

Порівняння спектральних яскравостей об'єкта вимірювання і нитки лампи 4 здійснюються звичайно при довжині хвилі, що дорівнює $0,65\ \mu\text{m}$, для чого перед окуляром установлений червоний світлофільтр 6. Вибір червоного світлофільтра обумовлений тим, що око людини сприймає через цей фільтр тільки частину спектра його пропущення, що наближається до монохроматичного променя. Крім того, застосування червоного світлофільтра дозволяє знизити нижню межу вимірювання пірометра. Діафрагми (вхідна 3 і вихідна 5) обмежують вхідний і вихідний кути пірометра, оптимальні значення яких дозволяють забезпечити незалежність показань приладу від зміни відстані між об'єктом вимірювання і об'єктивом.

Спостерігаючи за зображенням нитки лампи на фоні об'єкта вимірювання (світлий фон – темна нитка (рис.12.6 б), темний фон – світла нитка (рис.4.6 з), за допомогою реостата змінюють силу струму, що йде від батареї Б до нитки лампи, до того часу, доти яскравість нитки не стане

рівною видимій яскравості об'єкта вимірювання. При досягненні зазначеної рівності нитка «зникає» на фоні зображення об'єкта вимірювання (рис.12.6 в). У цей момент за шкалою міліамперметра, попередньо градуированого за значеннями температури яскравості нитки лампи, визначають яскравісну температуру об'єкта. За обмірюваною яскравісною температурою і відповідними виразами розраховують істинну температуру об'єкта.

Звичайно в оптичних пірометрах є дві шкали, однією з яких користуються при невстановленому поглинаючому світлофільтрі, наприклад від 800 до 1200°C, а іншою – при встановленому світлофільтрі від 1200 до 2000°C. Існуючі в цей час оптичні пірометри призначені для вимірювання температур в інтервалі від 800 до 6000°C і мають різні модифікації з різними межами вимірювання. Клас точності оптичних пірометрів 1,5-4,0.

На точність вимірювання температури оптичними пірометрами впливають ступінь відхилення властивостей випромінювача від властивостей чорного тіла, а також поглинання променів проміжним середовищем, через яке проводиться спостереження. На результати вимірювання впливають наявність у навколишньому повітрі пилу, диму і великого вмісту двоокису вуглецю. Крім того, усяке забруднення оптичної системи пірометрів також проводить до збільшення похибки вимірювання.

Перевагами оптичних пірометрів є порівняно висока точність вимірювання, компактність приладу і простота роботи з ними. До недоліків варто віднести потребу в джерелі живлення, неможливість стаціонарного вимірювання температури і автоматичного її запису, а також суб'єктивність методу вимірювання, заснованого на спектральній чутливості очей спостерігача.

Багато реальних тіл, такі, як кераміка, оксиди металів, вогнестійкі вироби, графіт та ін. є практично сірими. У цьому зв'язку переваги колірною методу вимірювання очевидні, тому що колірна температура багатьох твердих і рідких тіл значно менше відрізняється від істинної температури, ніж яскравісна або радіаційна.

Фотоелектричні пірометри. На відміну від оптичних візуальних пірометрів фотоелектричні пірометри є автоматичними. Чутливими елементами, що сприймають променисту енергію, у цих приладах можуть служити *фотоелементи, фотомножники, фотоелементи опору і фотодіоди*. Вимірювання температури фотоелектричними пірометрами, як і оптичними

візуальними, засновано на залежності спектральної яскравості тіла від його температури.

Фотоелектричні пірометри за принципом дії бувають двох типів. До першого типу відносять прилади, у яких сприймана приладом промениста енергія, потрапляючи на чутливий елемент, змінює його параметри (фотострум, опір). У приладах другого типу вимірювання променистої енергії здійснюється компенсаційним методом, тут чутливий елемент працює в режимі нуль-індикатора, порівнюючи інтенсивності випромінювання від вимірюваного тіла і стабільного джерела випромінювання - мініатюрної лампочки розжарювання.

Пірометри сумарного випромінювання. Вимірювання температури пірометрами сумарного випромінювання засновано на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Теплові промені, які уловлюються пірометром, концентруються за допомогою збірної лінзи на термочутливому елементі, що складається з невеликої термобатарей. Променистий потік направляється лінзою на робочі кінці термобатарей, за ступенем нагрівання яких роблять висновок про температуру випромінювача. Вторинним приладом пірометра служить мілівольтметр або автоматичний потенціометр.

Пірометр сумарного випромінювання характеризується рядом переваг у порівнянні з візуальним, що полягають в об'єктивності методу вимірювання, відсутності стороннього джерела живлення і можливості застосування дистанційної передачі показань на вторинні прилади, але уступає йому, як було зазначено раніше, у точності вимірювання.

Шкала пірометра, градуйована в °C радіаційної температури, має нерівномірні розподіли, сильно стислі на початку і розтягнуті наприкінці.

Для вимірювання температур вище 3000°C методи пірометрії є практично єдиними, тому що вони безконтактні, тобто не вимагають безпосереднього контакту датчика приладу з об'єктом вимірювання. Теоретично верхня межа вимірювання температури пірометрами випромінювання необмежена.

12.9. Тепловізори

Тепловізор (інфрачервона камера) це оптико-електронний вимірювальний прилад, що працює в інфрачервоній області електромагнітного спектра, який "переводить" у видиму область спектра власне теплове випромінювання людей або техніки. Тепловізор може

використатися як прилад для безконтактного вимірювання температури об'єктів і температурних полів.

Сучасний тепловізор має досить просту будову: об'єктив, тепловізійну матрицю (чутливий елемент) і електронний блок обробки сигналу. Матриця - це ґратка мініатюрних детекторів, що сприймає інфрачервоні сигнали і перетворює їх в електричні імпульси, які після посилення перетворюються у відеосигнал. Розмір фотоелектричних матриць у середньому 640×480 пікселів.

Тепловізори поділяють на дві категорії: з *охолоджуваною* і *не охолоджуваною матрицею*.

Охолоджувані – самі чутливі, дорогі і масивні, адже для охолодження використовуються криогенні технології, що дозволяють охолоджувати матрицю до температур мінус 170-210⁰С. Ціна і маса визначають і сферу застосування таких приладів. Мінуси камер з охолоджуваними матрицями - велике енергоспоживання і короткий термін служби криогенної системи, дорожнеча, а також те, що охолодження матриці до робочої температури займає звичайно кілька хвилин.

Не охолоджувані - на порядок дешевше, компактніше, але ціна за це - знижена чутливість. Перевага їх у тім, що вони починають працювати відразу після включення, мають довгий термін служби і низьке споживання енергії. Простота і відносна дешевизна неохолоджуваних тепловізорів зробили їх масовими. На рис.12.7 наведена узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною ІК-матрицею.

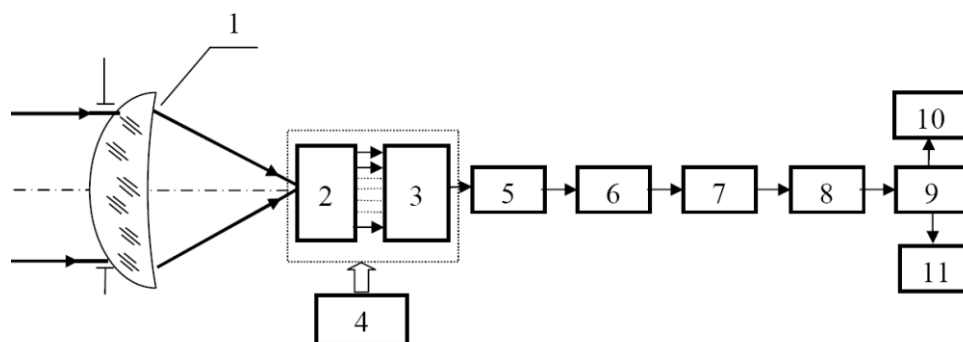


Рис. 12.7. Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею: 1 - оптична система; 2 - фокальна матриця із підсилювачами; 3 - мультиплексор; 4 - система охолодження; 5 - коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 - аналого-цифровий перетворювач; 7 - цифровий коректор неоднорідності; 8 - коректор; 9 - формувач зображення; 10 - дисплей; 11 - цифровий вихід

12.9.1. Принцип дії тепловізорів

Принцип роботи тепловізорів полягає в тому, що вони "бачать" не відбите інфрачервоне випромінювання, а власне випромінювання цілей і предметів. Кожне нагріте тіло випускає теплове випромінювання, інтенсивність і спектр якого залежать від властивостей тіла і його температури.

Принцип дії тепловізора такий: інфрачервоне (теплове) випромінювання від досліджуваного об'єкта через оптичну систему передається на приймач, що являє собою неохолоджувану матрицю термодетекторів. Далі отриманий відеосигнал за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації і математичної обробки відцифровується і відображається на екрані комп'ютера або дисплеї тепловізора. Тобто фізична картина фотоефекта така: ІК-фотони, потрапляючи на поверхню вузькозонного напівпровідника (*HgCdTe*, *InSb*), переводять носіїв заряду зі зв'язаного стану у вільний. Їх кількість пропорційна інтенсивності теплового випромінювання об'єкта.

Матриця фотоелектричних детекторів, яка встановлена у тепловізорі, обов'язково повинна охолоджуватися, інакше власні теплові коливання ґратки напівпровідника викликають настільки інтенсивне вивільнення носіїв заряду, що на його фоні генерація носіїв ІК-випромінювання стає просто непомітною.

Тепловізор зовсім безпечний для людини. Цей прилад тільки приймає інфрачервоне випромінювання, нічого при цьому не випромінюючи на відміну від рентгена, що шкодить здоров'ю людини.

Тепловізори поставляються із програмним забезпеченням, необхідним для зберігання і аналізу інфрачервоних зображень і для створення професійних звітів. Програмне забезпечення тепловізора дозволяє налаштувати і змінювати основні параметри збереженого зображення (компенсацію відбитого тепла, колірну палітру і т.д.). Це не тільки підвищує зручність і вірогідність обстеження тепловізором, але і відкидає необхідність повторного сканування встаткування.

Головна проблема тепловізорів - об'єктиви. Для виготовлення тепловізійних об'єктивів застосовується дуже дорогий матеріал - чистий германій. Зараз вартість об'єктива становить приблизно 45% вартості всього приладу, ще 45% - матриця.

12.9.2. Области застосування тепловізорів

Тепловізори застосовуються для контролю стану об'єктів і технологічних процесів у різних галузях промисловості, а також при проведенні наукових досліджень.

Области застосування тепловізорів: енергетика і енергоаудит, машинобудування, будівництво, нафтова і хімічна промисловість, транспорт і т.д. За допомогою тепловізора можна оперативно визначити передумови виникнення і наявність дефектів у нафто- і газопроводах, у теплотрасах, водопроводах і електричних з'єднаннях. Своєчасне виявлення за допомогою тепловізора температурних аномалій, що відбивають невидимі небезпечні процеси навколо нас, дозволить вжити заходів для усунення причин можливих аварій.

Приклади використання тепловізорів

1. Тепловізор у будівництві будинків і котеджів:

- виявлення порушення теплоізоляції та інших тепловтрат;
- виявлення дефектів стиків панелей, тріщин, погіршення теплоізоляційних властивостей, ділянок інфільтрації води, обривів арматур, ділянок більш пізнього ремонту.

2. Тепловізор в енергетиці:

- тепловізійний моніторинг ліній електропередач;
- виявлення дефектних контактів з'єднань комутаційних апаратів;
- виявлення засмічення теплообмінників на теплотрасах;
- виявлення проблем у теплоізоляції турбін, паро- і трубопроводів.

3. Тепловізор в енергозбереженні:

- енергоаудит;
- визначення теплоізоляційних властивостей матеріалів;
- діагностика огорожуючих конструкцій;
- виявлення тепловтрат у внутрішніх приміщеннях і зовні будинків і споруджень.

4. Тепловізор у хімічній промисловості:

- контроль температури продукту;
- перевірка герметичності та ізоляції ємностей для зберігання різних рідин і газів.

5. Тепловізор в авіакосмічній і військовій техніці:

- системи самонаведення на ціль, системи оповіщення про ранній запуск ракет;
 - теплова розвідка (виявлення живої сили і техніки);
 - авіакосмічна зйомка тепловізором. Спостереження за елементами земного ландшафту, підземними теплотрасами, льодовиками, ділянками геотермальної діяльності, лісами і водними просторами, фауною і т.ін.
- б. Тепловізори в медицині:
- моніторинг запальних процесів, локальних пухлин, порушення кровообігу, процесів загоєння ран, травм і т.ін.

12.9.3. Методика роботи з тепловізором

Тепловізійні вимірювання зовнішніх поверхонь проводять у зимовий або перехідний період відповідно до норм, установлених державою. У випадку відсутності проектно-технічної документації, вони проводяться при температурному перепаді повітря у внутрішніх і зовнішніх приміщеннях не менше 15⁰С.

Температурні поля поверхонь виходять у вигляді кольорового зображення, де градації кольору відповідають градації температур. Найясніші ділянки означають місця самих більших тепловтрат.

Вимірювання повинні проводитися за відсутності атмосферних опадів, туману, задимленості повітря, інею на поверхнях, прямого сонячного опромінення поверхонь. Тобто обстежувані поверхні не повинні перебувати в зоні певного сонячного опромінення за 12 годин до початку вимірювань.

Місця установлення тепловізійної камери вибирають таким чином, щоб поверхня об'єкта вимірювань перебувала в прямій видимості під кутом спостереження. На плані забудови відзначаються обрані точки зйомки. Об'єкт фотографують, реєструють порушення і дефекти зовнішніх поверхонь огорожуваних конструкцій, а також ділянки, що вимагають уточнення даних.

Одночасно з тепловізійною зйомкою зовнішніх поверхонь будинку відбувається реєстрація метеоумов - вимірюється температура повітря, напрямок і швидкість вітру. Вимірювання проводять також і у внутрішніх приміщеннях - температуру, рухливість і вологість повітря.

Коли вимірювання проведені, отримані термограми обробляються і порівнюються з розрахунковими даними.

Звичайно досвідчений фахівець за результатами може визначити місця зі зниженою теплоізоляцією, з різними дефектами через неякісний монтаж конструкцій або неправильні рішення. Тепловізійна зйомка останнім часом стає просто обов'язковим елементом в енергоаудиті.

Запитання для самоконтролю до теми 12

1. Які Ви знаєте методи вимірювання температури і види температурних шкал?
2. Пояснити класифікацію приладів для вимірювання температури.
3. Принцип роботи ртутних термометрів?
4. Принцип роботи дилатометричних термометрів?
5. Принцип роботи манометричних термометрів?
6. Як працюють термоелектричні термометри?
7. Як працюють термометри опору?
8. Для чого застосовуються пірометри?
9. Що Вам відомо про тепловізори?

Тема 13. Вимірювання геометричних розмірів

План

13.1 Загальні поняття

13.2 Геометричні величини

13.3 Вимірювання лінійних розмірів

13.1. Загальні поняття

Вимірювання – пізнавальний процес визначення числового значення вимірюваної величини, а також дія, спрямована на знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом, порівнюючи її з одиницею вимірювання за допомогою засобів вимірювальної техніки.

Числове значення вимірюваної величини – число, яке виражає відношення між двома величинами однакової природи – вимірюваною й умовною одиницею вимірювання.

Згідно із Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та ДСТУ 2681-94:

Вимірювання – відображення фізичних величин їх значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів.

У цьому визначенні закладені наступні *головні ознаки* поняття «вимірювання»:

- вимірювати можна властивості реально існуючих об'єктів пізнання – фізичні величини;
- вимірювання вимагає проведення дослідів, тобто теоретичні міркування чи розрахунки не замінять експеримент;
- результатом вимірювання є фізична величина, відбиває значення вимірюваної величини.

Згідно з новим Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність», що набрав чинності в 2016 року, **вимірюванням** вважається процес експериментального визначення одного або декількох значень величини, які можуть бути обґрунтовано приписані величині^[3].

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

До засобів вимірювальної техніки відносяться *засоби вимірювань* (міри фізичних величин, вимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі, вимірювальне устаткування, вимірювальні інформаційні системи та ін.) та *вимірювальні пристрої*.

1. Сутність вимірювань. В науці вимірювання є одним з основних засобів пізнання навколишнього світу, в результаті якого отримується вимірювальна інформація. Вимірювання може відбуватись з використанням як безшкального засобу вимірювання (наприклад, калібр (вимірювання)), так і шкальними приладами вимірювання (лінійка, ваги, витратомір, акселерометр, спідометр та ін.).

Сутність найпростішого вимірювання полягає в порівнянні розміру фізичної величини Q розмірами вихідної величини регульованої багатозначної міри $q[Q]$.

У результаті порівняння встановлюють, що:

$$q[Q] < Q < (q+1)[Q] \quad (13.1)$$

Звідси виходить, що:

$$q = \text{Int} \left(\frac{Q}{[Q]} \right) \quad (13.2)$$

де $\text{Int}(X)$ – функція, що виділяє цілу частину числа X .

Основне рівняння вимірювання має такий вигляд:

$$Q = q[Q] \quad (13.3)$$

де Q – значення фізичної величини, оцінка розміру величини у вигляді деякого числа прийнятих для неї величин. Числа Q – це результати вимірювань, вони можуть використані для будь-яких математичних операцій.

q – числове значення фізичної величини, абстрактне число, що відображає відношення значення величини до відповідної одиниці даної фізичної величини.

$[Q]$ - одиниця фізичної величини, тобто це фізична величина фіксованого розміру, якому умовно присвоєно числове значення, рівне одиниці.

Права частина рівняння називається *числовим значенням вимірюваної величини*.

Природа вимірювання. Вимірювання можливе через наявність кількісних характеристик в об'єктах матеріальної дійсності, здатності цих об'єктів змінюватися в широких межах, не втрачаючи якісної своєрідності.

Елементи вимірювань. Вимірювання передбачає такі основні складові елементи: об'єкт вимірювання, тобто вимірювану величину, спостерігача або

технічний пристрій, що сприймає результати вимірювання, прилади для вимірювання, умови навколишнього середовища, в яких проводяться вимірювання, одиницю вимірювання, метод вимірювання і остаточний результат вимірювання.

Процедура вимірювання та вимірювальні операції. Вимірювання виконуються за процедурою, яка визначається методикою виконання вимірювань.

Процедура вимірювання – це послідовність вимірювальних операцій, що забезпечує вимірювання згідно з обраним методом. Отже, процедура вимірювання складається з вимірювальних операцій.

Вимірювальна операція – це операція з фізичними величинами або їх значеннями під час вимірювання. До вимірювальних операцій належать: відтворення фізичної величини, порівняння фізичних величин і вимірювальне перетворення.

Відтворення фізичної величини – вимірювальна операція, що полягає у створенні та (чи) зберіганні фізичної величини заданого значення.

Порівняння фізичних величин – вимірювальна операція, що полягає у порівнянні двох розмірів (значень) однорідних фізичних величин.

Вимірювальне перетворення фізичних величин – вимірювальна операція, під час якої одна фізична величина перетворюється в іншу, функціонально з нею зв'язану. Фізичний ефект, на якому ґрунтується вимірювальне перетворення, називають принципом вимірювального перетворення. Вимірювальні перетворення поділяють на перетворення без зміни роду та зі зміною роду вихідної фізичної величини, а також на лінійні та нелінійні за видом функціональної залежності (лінійна чи нелінійна) між початковою величиною й тією величиною, що одержують після перетворення. Одним з поширених видів лінійного перетворення фізичної величини є масштабне вимірювальне перетворення, під яким розуміють лінійне вимірювальне перетворення фізичної величини без зміни її роду.

Метрологічне забезпечення вимірювань. Успішне вирішення наукових і технічних задач, у тому числі забезпечення якості продукції у значній мірі залежить від ступеня досягнення єдності і достовірності (точності) вимірювань.

Єдність вимірювань – стан вимірювань, коли результати виражені в узаконених одиницях, а похибки результатів вимірювань відомі із заданою ймовірністю та не виходять поза задані межі. Єдність вимірювань необхідна

для забезпечення порівняльності результатів вимірювань, проведених у різних місцях, в різний час з використанням різних методів і засобів вимірювання.

Точність вимірювань – характеристика ступеня наближення результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. Для конкретних умов і цілей вимірювання існує свій раціональний рівень точності, котрий недоцільно перевищувати через зростання складності відповідних вимірювань.

Питання єдності і точності вимірювань вивчаються метрологією – наукою про вимірювання, методи і засоби забезпечення їхньої єдності і способи досягнення необхідної точності.

Завдання забезпечення єдності і точності вимірювань у державі покладено на *Державну систему забезпечення єдності вимірювань* (ДСВ) – комплекс нормативних, нормативно-технічних і методичних документів міжгалузевого рівня, котрі встановлюють правила, норми, вимоги, спрямовані на досягнення і підтримку єдності вимірювань в країні при необхідній точності.

Ця система відіграє особливу роль. У сучасній промисловості затрати праці на виконання вимірювань складають близько 10% загальних затрат праці на всіх стадіях створення і експлуатації продукції, а в окремих галузях промисловості досягають 50-60% (електронна, радіотехнічна та інші). Ефективність цих затрат визначається достовірністю і відтворюваністю вимірювань, які можуть бути досягнуті лише в умовах добре організованого метрологічного забезпечення господарства країни.

ДСВ ґрунтується на трьох основах: технічній, організаційній і нормативній.

Технічну основу ДСВ складають державні еталони, еталони фізичних одиниць та стандартні зразки, на кожний з яких розроблено відповідний нормативний документ. Порядок створення цих нормативних документів, їх структура регламентуються вимогами Державної системи стандартизації України.

Організаційною основою ДСВ є метрологічні служби, котрі забезпечують метрологічний нагляд і контроль у рамках своїх повноважень.

Нормативними документами ДСВ є державні стандарти, правила, положення, інструкції та рекомендації. Стандарти ДСВ позначаються перед номером стандарту цифрою 8. Прикладом нормативно-технічних документів

ДСВ та інших систем є: ГОСТ 8.002-86; ГОСТ 8.009-84; ГОСТ 8.010-90 ПР 50.2.009-94; ПР 50.2.006-94.

Класифікація вимірювань. За фізичною природою вимірюваних величин вимірювання розподіляють на області і види. Під областю вимірювань фізичних величин розуміють фізичні величини, які властиві певній галузі науки та техніки й виділяються своєю специфікою. Вид вимірювань є частиною області вимірювань, що має свої особливості й відрізняється однорідністю вимірюваних величин. Поділ вимірювань на області та види не є сталим, він залежить від об'єктивних і суб'єктивних факторів. Один із варіантів такого поділу вимірювань, прийнятий Держстандартом України ^[1] розглядає вимірювання:

- геометричних величин (довжини, переміщення, кутів, плоских і складних геометричних форм, шорсткості, круглості та ін.);
- механічних величин (маси, густини, сили, крутного моменту, деформації та ін.);
- параметрів потоку, витрат, рівня й об'єму речовин;
- тиску, вакуумні вимірювання;
- оптичних і оптико-фізичних величин;
- теплофізичних величин і температури;
- часу і частоти;
- електричних і магнітних величин;
- в радіоелектроніці;
- акустичних величин;
- фізико-хімічного складу і властивостей речовин;
- характеристик іонізуючих випромінювань і ядерних констант.

Крім цього вимірювання класифікують за наступними ознаками:

1) За характеристиками точності числових значень вимірюваної величини вимірювання поділяються на два види:

Метрологічні вимірювання, котрі поділяються на:

- *вимірювання з максимально можливою точністю* відповідно до наявного технічного рівня. Це вимірювання за допомогою еталонів і спрямовані насамперед на відтворення встановлених одиниць фізичних величин або ж фізичних констант.
- *контрольно-повірочні вимірювання*, похибки вимірювання яких не перевищують деяких наперед заданих значень. До них

відносяться лабораторні вимірювання фізичних величин за допомогою зразкових засобів вимірювання високої точності.

Технічні вимірювання – вимірювання що проводяться у промислових умовах і визначаються зазвичай нижчим класом точності засобів вимірювання, ніж у попередніх двох випадках.

2) За числом вимірювань у ряді вимірювань – на разові та багаторазові. Найпоширенішими є одноразові вимірювання, тобто вимірювання фізичної величини виконані один раз. Проте в цілій низці практичних випадків, зокрема при використанні результатів вимірювань для прийняття рішень про стан якогось об'єкта або при виконанні вимірювань з підвищеною точністю, вимірювання одного і того самого розміру фізичної величини здійснюються декілька разів, тобто багаторазово. Отже, до багаторазових вимірювань слід віднести ті вимірювання, результат яких отримують шляхом обробки результатів повторних вимірювань фізичної величини одного і того самого розміру, виконаних більше трьох разів. Це пояснюється тим, що саме за таких умов для обробки результатів вимірювань можуть бути використані методи математичної статистики. Вимірювання одного і того самого розміру фізичної величини, які повторюються два або три рази, допускається називати дво- або триразовими;

3) За характером зміни вимірюваної величини в часі – на статичні та динамічні:

- **статичні вимірювання** – це вимірювання, при яких протягом певного проміжку часу вимірювана величина майже не змінюється або ж її значення змінюється поступово згідно з технологічним процесом.
- **динамічні вимірювання** – вимірювання, які показують зміну вимірюваної величини в часі при різних збуреннях, що впливають на об'єкт дослідження або ж на спосіб вимірювання. Динамічні вимірювання дають можливість вивчати динамічні властивості об'єкта і засобів вимірювальної техніки, особливо давачів (первинних вимірювальних перетворювачів).

4) За відображенням результатів вимірювання – абсолютні та відносні:

- **абсолютними** називаються вимірювання, значення яких подані у абсолютних одиницях фізичних величин (тиск у паскалях, довжина у метрах, час у секундах і т. д.).

- *відносними* називаються вимірювання, значення яких подані як відношення вимірюваної величини до однойменної, умовно прийнятої за одиницю, або ж у відсотках (наприклад, швидкість руху виражена числом Маха, вологість повітря у відсотках від повного насичення).

5) За способом одержання числового значення вимірюваної величини – прямі; непрямі (опосередковані, сумісні та сукупні):

При *прямому вимірюванні* результат одержують безпосередньо за експериментальними даними (вимірювання довжини лінійкою, вимірювання температури термометром, вимірювання тиску манометром). Вони є найпоширенішими.

При *непрямому вимірюванні* числове значення величини відшуковують не безпосередньо, а на основі вимірювання інших величин, пов'язаних з вимірюваною величиною відомою математичною залежністю (визначення об'єму рідини у циліндричній посудині за висотою рідини в ній та площею дна: $V=Sh$; густини рідини за масою і її об'ємом: $\rho=m/V$).

Опосередковане вимірювання – непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленнями за результатами вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функційною залежністю. Характерним для опосередкованих вимірювань є функціональне вимірювальне перетворення, яке здійснюється або шляхом фізичного вимірювального перетворення, або шляхом числового вимірювального перетворення.

При *сумісних вимірюваннях* значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано^[2]. Переважно, результати таких вимірювань використовують у наукових дослідженнях.

При *сукупних вимірюваннях* значення декількох одночасно вимірюваних однорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, що пов'язують їх різні сполучення, що вимірюються прямо чи опосередковано^[2] (наприклад, визначення коефіцієнта лінійного теплового розширення).

2. Основні характеристики вимірювань

Похибка вимірювання. Важлива ознака вимірювання – точність. Ступінь точності змінюється залежно від вимог, які ставлять до результату вимірювання. На практиці не тільки неминучі, а й допустимі різні похибки вимірювання. Розроблено спеціальні методи оцінки й компенсації цих похибок.

Якість результатів вимірювання характеризується надійністю, правильністю і точністю. Існують три складові частини загальної похибки вимірювання і відповідні їм показники якості результатів вимірювання: грубі, систематичні і випадкові похибки. Відсутність грубих похибок (промахів) характеризує надійність результатів і досягається організацією вимірювання. Вилучення систематичних похибок характеризує правильність результатів і досягається за допомогою введення спеціальних коефіцієнтів або поправок. Випадкові похибки є неминучими, а їхні величини і закон розподілу характеризують точність результатів вимірювання.

Принципи, засоби та методи вимірювання. З метою забезпечення точності вимірювань фізичних величин у метрології розроблені способи використання принципів і засобів вимірювальної техніки, дотримання яких дозволяє уникнути при отриманні результатів вимірювань низки систематичних і випадкових похибок.

Принцип вимірювання – фізичне явище або сукупність фізичних явищ, які покладені в основу вимірювання певної фізичної величини. Наприклад, вимірювання температури за допомогою використання термоелектричного явища, зміни електричного опору терморезистора чи зміни тиску термометричної речовини манометричного термометра та ін.

Метод вимірювання – сукупність способів використання засобів вимірювальної техніки та принципів вимірювань для створення вимірювальної інформації^[2].

У виробництві та повсякденному житті у процесі вимірювань переважно застосовують прямі методи, що забезпечують визначення шуканої величини безпосередньо за експериментальними даними. До прямих методів вимірювання відносяться (перелік не є вичерпним):

1) Метод безпосередньої оцінки – вимірювана величина зчитується безпосередньо з шкали, табло чи екрану показувального пристрою вимірювального приладу (наприклад, вимірювання зусилля пружинним динамометром, визначення маси зважуванням на циферблатній вазі, вимірювання електричного струму амперметром). Вимірювання цим методом не є складним, проте точність невисока, але простота методу, швидкість процесу вимірювання визначив його широке застосування на практиці.

2) Метод порівняння з мірою полягає в тому, що вимірювана величина порівнюється з величиною, що відтворена мірою (**міра** – це засіб вимірювань, що реалізує відтворення та (або) збереження фізичної величини

заданого значення). Він відрізняється постійною участю міри в процесі вимірювань (причому за показниками вимірювального приладу оцінюється лише частина вимірюваної величини). Результат вимірювання визначається як сума значень порівняльної міри (наприклад, зважування на аналітичній вазі) і показу вимірювального приладу. Точність методу порівняння значно вища за точність методу безпосередньої оцінки, але складність застосування приладів і самого процесу вимірювання інколи обмежує його застосування. Цей метод за технічними особливостями може бути реалізований як:

Метод зіставлення – це метод порівняння з мірою, коли вимірювана і відтворена мірою величини одночасно діють на пристрій порівняння. Значення шуканої величини визначається після досягнення рівноваги (наприклад, визначення маси на вазі важільного типу, як суми мас гир, що її зрівноважують).

Нульовий (компенсаційний) метод полягає у порівнянні величини з мірою, а результат впливу величин на прилад зводиться до нуля. Цей метод використовується в автоматичних вимірювальних приладах: вимірювальних мостах, потенціометрах, аналізаторах рідин та газів та ін.

Диференціальний (різницевий) метод полягає у визначенні вимірювальним приладом різниці між вимірювальною величиною та відомої (відтвореної) величини (наприклад, вимірювання надлишкового тиску диференціальним манометром). Точність диференціального методу зростає зі зменшенням різниці між порівнюваними величинами.

Метод одного збігу (ноніусний) полягає у тому, що збігання між вимірюваною величиною і величиною відтвореною мірою визначається за збігом міток шкал або періодичних сигналів. Цей метод використовують при вимірюванні точних сигналів часу, частоти обертання з використанням стробоскопа, розмірів штангенциркулем тощо.

Метод подвійного збігу (метод коінциденції) полягає в одноразовому порівнянні n зістикованих вимірюваних величин X одного і того самого розміру із зразковою величиною X_0 , що відтворюється багатозначною нерегульованою мірою зі ступенем ΔX_0 . Результат вимірювання визначається за формулою:

$$X = N \frac{\Delta X_0}{n} \quad (13.4)$$

Метод заміщення – це метод порівняння, в якому вимірювана величина X заміщується величиною X_0 , що відтворюється регульованою мірою.

Точність методу заміщення залежить тільки від похибки міри і практично не залежить від систематичної похибки вимірювального приладу, що є суттєвою перевагою методу заміщення. Метод використовується у засобах вимірювальної техніки високої точності, в тому числі в еталонах.

Збіжність вимірювань. У більшості випадків вимірювання – це багаторазове спостереження величини, що вимірюється. При цьому одержують сукупність вимірів, які необхідно сумісно обробити для одержання результату. Уточнений результат вимірювання одержують шляхом вилучення систематичних і випадкових похибок.

Збіжність вимірювань – характеристика якості вимірювань, що відображає близькість повторних результатів вимірювань однієї і тієї ж величини в однакових умовах.

Відтворюваність вимірювань – характеристика якості вимірювань, що відображає близькість результатів вимірювань однієї й тієї самої величини, виконаних у різних умовах (у різний час, у різних місцях, різними методами і засобами)^[2] але приведені до однакових умов вимірювання (температура, тиск, вологість та ін.).

3. Статистична обробка результатів вимірювань

Прямі вимірювання. Визначення фізичної величини x за результатами проведених вимірювань проводиться в такій послідовності:

1) Проводять n вимірювань фізичної величини x , внаслідок яких отримують ряд значень $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

2) Обчислюють найімовірніше значення вимірюваної величини, яким є середнє арифметичне з результатів окремих вимірювань:

$$\tilde{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13.5)$$

Середнє значення вимірюваної величини \tilde{x} наближається до істинного x при дуже великому числі вимірювань. При кінцевому числі вимірювань n це виконується з похибкою, і результат вимірювань подається у вигляді довірчого інтервалу $(\tilde{x} - \Delta X) \leq x \leq (\tilde{x} + \Delta X)$, в якому буде знаходитись шукана величина x з імовірністю α , що називається довірчою ймовірністю, або надійністю.

Довірча ймовірність показує, яка частина вимірювань при великому їх числі потрапляє в довірчий інтервал.

Для розрахунку абсолютної похибки Δx , що визначає нижню і верхню межі довірчого інтервалу, необхідно виконати наступні дії:

1) Знаходять відхилення результатів кожного вимірювання від середнього значення:

$$\Delta x_1 = \tilde{x} - x_1; \Delta x_2 = \tilde{x} - x_2; \dots; \Delta x_n = \tilde{x} - x_n \quad (13.6)$$

і обчислюють суму квадратів відхилень від середнього:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2 \quad (13.7)$$

2) Задаються довірчою ймовірністю вимірюваної величини α .

3) За значенням довірчої ймовірності α і числа вимірювань n з таблиць знаходять значення коефіцієнта Стьюдента $t_{\alpha,n}$.

4) Визначають абсолютну похибку за формулою розподілу Стьюдента:

$$\Delta x = t_{\alpha,n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (13.8)$$

Абсолютна похибка Δx (а також і довірчий інтервал) тим менша, чим менший коефіцієнт Стьюдента, який у свою чергу можна змінити збільшенням числа вимірювань n , заданням меншої довірчої ймовірності α чи зменшенням похибок окремих вимірювань.

5) Наступним кроком розраховують відносну похибку, що також характеризує точність вимірювань:

$$\delta = \frac{\Delta x}{\tilde{x}} \quad (13.9)$$

6) Остаточний результат подається у вигляді значень величини з довірчим інтервалом та відносної похибки:

$$x = (\tilde{x} \pm \Delta x)_{\alpha}; \quad \delta\% = \frac{\Delta x}{\tilde{x}} \cdot 100\%. \quad (13.10)$$

Непрямі вимірювання. При визначенні похибки непрямих вимірювань, коли фізична величина розраховується за робочою формулою, насамперед необхідно одержати формули для обчислення похибок у кожному конкретному випадку. Похибки непрямих вимірювань знаходять за відомими похибками прямих вимірювань

Для простого випадку, коли шукана величина обчислюється сумою (різницею) $x = a + b$, і при цьому величини a і b визначаються прямими вимірюваннями у вигляді довірчих інтервалів:

$$a = (\tilde{a} \pm \Delta a)_{\alpha}; \quad b = (\tilde{b} \pm \Delta b)_{\alpha}. \quad (13.11)$$

Тоді середнє значення величини знаходиться як сума (або різниця) середніх значень величин, отриманих прямими вимірюваннями, що додаються, а абсолютна похибка дорівнює сумі абсолютних похибок відповідних доданків:

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= \tilde{a} + \tilde{b} \\ \Delta x &= (\Delta a + \Delta b)_\alpha\end{aligned}\quad (13.12)$$

Якщо ж вимірювана величина обчислюється як функція декількох співмножників, то середнє значення знаходять за *робочою формулою* через середні значення вимірних складових, а формулу для отримання абсолютної похибки можна отримати наступним чином:

1) Задану робочу формулу спочатку логарифмують за основою натурального логарифма.

2) Отриманий вираз диференціюють.

3) Вважаючи, що похибки малі, переходять на кінцеві прирости, замінюючи знак диференціала d на Δ а істинні значення середніми.

4) Статично незалежні величини додаються геометрично, тому відносна похибка шуканої величини визначається як геометрична сума окремих похибок.

5) За відносною похибкою знаходять абсолютну з врахуванням раніше обчисленого за робочою формулою середнього значення вимірюваної величини.

6) Остаточний результат записують у вигляді довірчого інтервалу та відносної похибки.

Різновиди вимірів.

Виміри рівноточні – виміри однієї або декількох однорідних величин проведені при однакових умовах: інструментами однакової точності, одним і тим же методом, спостерігачами однакової кваліфікації та досвідченості, при однакових приблизно зовнішніх умовах.^[11]

Виміри нерівноточні – виміри однієї або декількох однорідних величин проведені при неоднакових умовах.

13.2. Вимірювання геометричних величин

У класифікації фізичних величин за їх фізичними властивостями (прийнятій, зокрема, в Міжнародній системі одиниць) одну із величин становлять величини простору та часу, до якої належать геометричні розміри, час та параметри руху.

Геометричні розміри – це широка група понять лінійних та кутових розмірів, площі та об'єму.

Своєю чергою, до *лінійних* розмірів належить довжина, товщина (грубизна) покриття, відстань між об'єктами, рівень, шорсткуватість (нерівність) поверхні тощо.

Головними *кутовими* розмірами є плоский та тілесний кути. Час є однією із семи основних одиниць СІ. Час, як і простір, – це одна із форм існування матерії. Вони нерозривно пов'язані між собою, характеризуючи, зокрема, параметри руху матерії, тобто динаміку матерії в просторі та в часі. Лінійні та кутові переміщення, швидкості та прискорення характеризують просторово-часовий стан об'єктів (матерії) одного щодо іншого, прийнятого за нерухомий. Одним із різновидів параметрів руху є витрати рідких чи газоподібних речовин.

Вимірювання лінійних та кутових розмірів. Вимірювання лінійних та кутових розмірів займають значне місце в різних галузях науки та техніки, зокрема, в машино– та приладобудуванні, де вимірювання цих величин займають до 80% від всіх вимірювань в цих галузях. Завдання вимірювань лінійних та кутових розмірів можна розділити на такі групи:

1) Вимірювання лінійних розмірів в діапазоні від часток мкм до декількох десятків метрів та кутових розмірів, обмежених найчастіше повним колом з діапазоном вимірюваних значень кутових розмірів від $0,1^\circ$ до 360° . Найпоширенішими в цій групі є вимірювання розмірів деталей, відхилення розміру деталі від заданого значення, вимірювання параметрів шорсткуватості поверхні, товщини покриття;

2) Вимірювання розмірів від часток метра до сотень метрів при визначенні рівня рідких та сипучих речовин у різних резервуарах та свердловинах, рівня пального в баках різних транспортних засобів;

3) Визначення координат об'єктів та відстаней між об'єктами, зокрема і космічними, що знаходяться в межах від одиниць міліметра до мільйонів кілометрів.

Останнім часом під впливом інтенсивного розвитку інтегральних схем, мікропроцесорних пристроїв відбулось корінне оновлення та значне урізноманітнення техніки, що застосовується при вимірюваннях лінійних та кутових розмірів. Сьогодні, завдяки прогресу в конструюванні приладів, можуть бути реалізовані такі методи вимірювань, які ще декілька років тому здавалися неймовірними. Нові апаратні рішення ведуть до появи нових різновидностей методів вимірювань.

Донедавна для вимірювань геометричних розмірів застосовували здебільшого прилади, що працюють за аналоговим принципом. Сьогодні в зв'язку зі значним прогресом в галузі первинних вимірювальних перетворювачів та винятковими можливостями цифрової вимірювальної

техніки на перший план виходять цифрові засоби вимірювань цих величин. Їх основні переваги: можливість автоматизації вимірювального процесу та автоматичної обробки результатів вимірювань, неперервний запис результатів вимірювань тощо. Тому зупинимось тільки на електричних засобах, зокрема з цифровим виходом, не забуваючи про те, що основною ланкою засобів вимірювань геометричних розмірів є первинний вимірювальний перетворювач.

Основні електричні методи та відповідні засоби вимірювань лінійних та кутових розмірів залежно від наявності чи відсутності механічного контакту між досліджуваним об'єктом та засобом вимірювань поділяють на контактні та безконтактні, а залежно від принципу вимірювального перетворення методи поділяють на *електромеханічні*, *електрофізичні* та *спектрометричні (хвильові)*.

Електромеханічні методи залежно від виду первинного перетворювача поділяють на резистивні, індуктивні, ємнісні, оптоелектронні, обкочування тощо.

Електрофізичні методи вимірювань основані на використанні відмінності в фізичних властивостях речовин, що знаходяться на різних сторонах границь вимірюваного розміру.

Для вимірювань лінійних та кутових розмірів використовують методи та прилади, основані на відмінностях електричних, магнітних, теплових та інших властивостей. Відповідно електрофізичні методи поділяються на електромагнітні, ємнісні, кондуктометричні тощо.

Найпоширенішими з електромагнітних є вихроструміві та резонансні методи.

Спектрометричні методи та відповідні засоби вимірювань залежно від довжини хвилі випромінювання, що використовується при вимірюванні, поділяють на звукові, ультразвукові, радіохвильові, надвисокочастотні, оптичні (лазерні).

Залежно від фізичних явищ, які використовуються при вимірюванні, спектрометричні методи класифікують на локаційні, інтерферометричні, рефрактометричні тощо.

Електромеханічні методи широко застосовуються для вимірювань розмірів деталей та шорсткуватості поверхні (контактні штангенциркулі., мікрометри, профілометри), для вимірювань рівня (поплавкові та буйкові рівнеміри).

Для вимірювань відстаней, пройдених транспортними засобами, широко використовують спосіб обкочування.

В контактних мікрометрах та профілометрах координати досліджуваного об'єкта попередньо перетворюються в лінійне переміщення голкоподібного щупа, а згодом в електричний сигнал за допомогою індуктивних, взаємоіндуктивних чи ємнісних перетворювачів.

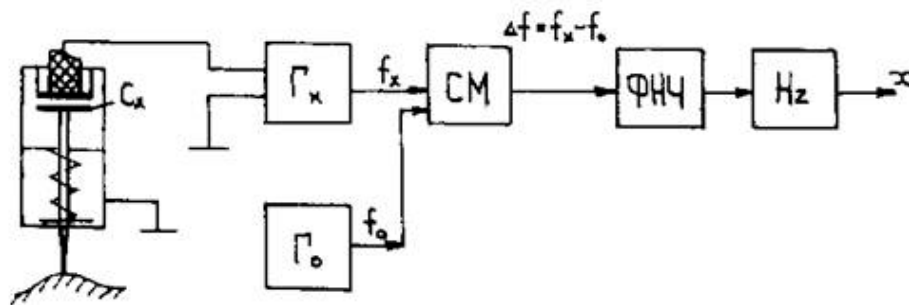


Рис. 13.1. До принципу дії ємнісного профілометра

Рис.13 1 пояснює принцип дії вимірювача малих розмірів на основі ємнісного перетворювача, який є елементом І-С-контура кварцового генератора. Ємнісний перетворювач має нерухомий електрод 1, напилений на полірований скляний стержень 2, та рухомий електрод 3, механічно з'єднаний з голкоподібним щупом 4, закріпленим в корпусі за допомогою плоских пружин 5. Ємнісний перетворювач за допомогою кабеля з'єднаний з кварцовим генератором, вихідна частота f_x якого є функцією ємності C_x між рухомим та нерухомим електродами. Частота f_x та частота f_0 від опорного генератора частоти подаються на вхід змішувача, вихідна частота якого $\Delta f = f_x - f_0$. Виміряна частотоміром частота Δf відповідатиме значенню вимірюваного розміру.

Враховуючи, що:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \quad (13.13)$$

а при $C_x = C_{x0} + \Delta C = C_0 + \Delta C$:

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_x}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0 \left(1 + \frac{\Delta C}{C_0}\right)}} \quad (13.14)$$

отримаємо рівняння:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0 \left(1 + \frac{\Delta C}{C_0}\right)}} - \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \right) \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C_0} f_0 \quad (13.15)$$

За наведеною схемою будуються мікрометри з порогом чутливості в частки мкм та діапазоном вимірювань 0,1...1 мм.

Такий мікрометр може використовуватись для вимірювань параметрів шорсткуватості. Однак у цьому випадку можуть виникати значні похибки через деяку нелінійність в перетворенні реального профілю шорсткуватої поверхні в лінійне переміщення щупа. Виникають також похибки через відривання щупа в деяких точках профілю поверхні та внаслідок деформації (пружної та пластичної) досліджуваної поверхні під дією сили з боку щупа. Ці похибки визначаються зусиллям, що створюється щупом. Це зусилля загалом не є сталим і може змінюватись залежно від інерційності перетворювача, радіуса щупа, властивостей матеріалу та характеру профілю досліджуваної поверхні. В цьому відношенні перевагу має віброконтактний метод, оснований на перетворенні в електричний сигнал коливань віброуючого щупа.

Віброконтактний метод дає змогу здійснювати вимірювання при незначних зусиллях щупа, який тільки періодично торкається досліджуваного об'єкта. Завдяки цьому можна використати тонкі щупи, що дає можливість вимірювати розміри деталей, що легко деформуються, а також об'єктів складної конфігурації.

Подібними за своєю конструкцією та вимірювальним колом є індуктивні мікрометри-профілометри, в яких вимірювальний щуп у своїй верхній частині має закріплений феритовий стержень, котрий при переміщенні штока змінює індуктивність вимірювальної котушки. Котушка, індуктивність L_x якої є функцією вимірюваного переміщення x , становить частотнозалежний елемент LC-генератора.

Якщо частина опорного генератора описується рівнянням:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \quad (13.15)$$

а частота вимірювального генератора становить:

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x C_0}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0 \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)}} \quad (13.16)$$

то результуюча функція перетворення буде мати вигляд:

$$\Delta f \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L_0} f_0. \quad (13.17)$$

Мікрометри-профілометри з індуктивним первинним перетворювачем дають змогу вимірювати мікронерівності від 0,1 мкм, а верхня границя вимірювань становить звичайно декілька мм.

Здебільшого в приладо – та машинобудуванні необхідно вимірювати не все значення розміру, яке може досягати десятків см і більше, а лише його відхилення від деякого заданого значення, оскільки в процесі виготовлення деталі контролюється її розмір. Ці відхилення звичайно не перевищують часток мм, а отже, названі мікрометри можуть бути застосовані для цих потреб.

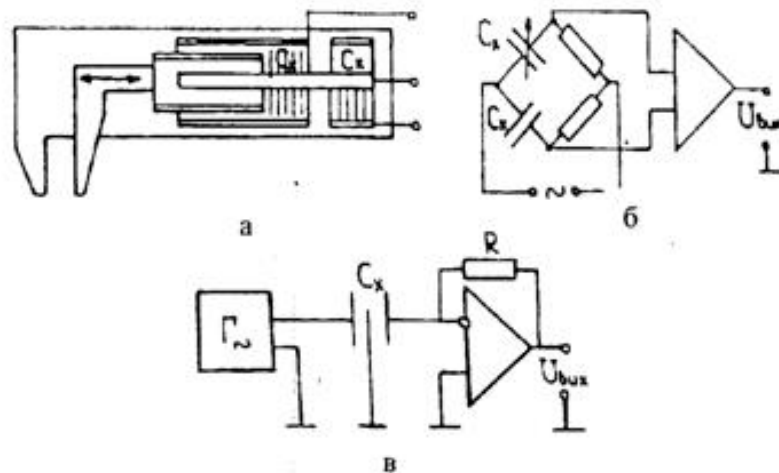


Рис. 13.2 Ємнісний штангенциркуль та приклади його вимірювальних кіл

Для вимірювань розмірів у діапазоні часток міліметра до декількох сантиметрів застосовують штангенциркуль (рис.13 2, а) з довгоходовим щупом 1 та ємнісним перетворювачем переміщень. Останній складається з циліндричних зовнішнього 2 та внутрішнього 3 електродів і екрана 4 з електропровідного матеріалу, з'єднаного механічно з вимірювальним щупом. При переміщенні екрана ємність вимірювального конденсатора буде змінюватись пропорційно вимірюваному переміщенню. Для виключення впливу довкілля на результат вимірювань передбачений компенсуючий конденсатор, ємність C_k якого дорівнює ємності вимірювального конденсатора при $x=0$. Приклади електричних вимірювальних кіл такого штангенциркуля наведені на рисунках 13.2, б, в.

Електрофізичні методи застосовують звичайно у вимірювачах товщини шару покриття та тонких листових виробів.

13.3. Вимірювання лінійних розмірів

13.3.1. Шкальні засоби вимірювання

Ці засоби призначені для вимірювання довжини, діаметрів і кутів методом порівняння зі штриховою мірою (шкалою) або еталоном. Перший

принцип реалізований у штангенінструментах, мікрометричних інструментах і кутомірах типів РОЗУМ і УН. Для підвищення точності відліку у цих пристроях застосовуються ноніуси. Похибки штангенінструментів, що припускається $\pm 0,05$ мм, мікрометри - $\pm 0,004$ мм, кутоміри - $\pm 2' \dots \pm 5'$ [5].

Другий принцип реалізується у важіль-механічних приладах (індикаторах годинникового типу, вимірювальних головках з важіль-зубчатою передачею, пружинних головках). Ці прилади показують на стрілкових шкалах відхилення вимірювального розміру від відомого розміру еталона. Для підвищення точності у них використовуються механіко-механічні вимірювальні перетворювачі. Похибка даних засобів вимірювання знаходиться у межах від 0,01 до 0,0001 мм [5].

13.3.2. Пневматичні вимірювальні прилади

Пневматичні прилади застосовуються для лінійних вимірювань методом порівняння з еталоном. Вони забезпечують високу точність і відносно невеликі витрати часу на вимірювання і дозволяють їх здійснювати безконтактним і контактним методами.

На рис. 13.3 показана блок-схема пневматичного ежекторного приладу для безконтактного вимірювання відхилення L розміру вимірюваного виробу 3 від еталона (як правило, блока кінцевих заходів). Стиснуте повітря під постійним надмірним тиском виходить з вхідного сопла 1 безпосередньо у вимірювальне сопло 2 і далі через кільцевий зазор – в атмосферу. Постійність тиску і чистота стиснутого повітря, що подається з джерела 9, забезпечуються стабілізатором тиску 7 і фільтром очищення 8. Тиск у вимірювальній камері 4 залежить від величини зазору. Ця залежність має значну лінійну ділянку (для сопла діаметром 1,75 мм від 0,190 до 0,600 мм). Тиск за допомогою вимірювальної схеми 5 перетвориться у сигнал, зручний для реєстрації індикатором 6.

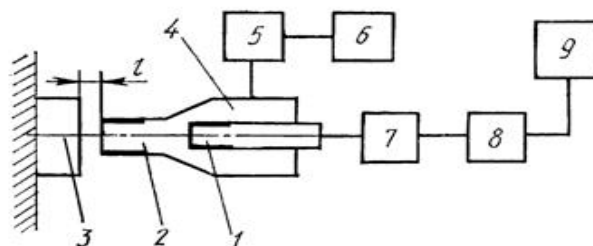


Рис. 13.3. Блок-схема ежекторного приладу для вимірювання лінійних розмірів

Найдосконалішою є диференціальна вимірювальна схема, в якій вимірником (рідинним, сифонним або мембранним манометром) визначається різниця тиску у двох гілках системи - робочої і калібрувальної (з регульованим зазором L).

Схема диференціального пневматичного ежекторного приладу для контактного вимірювання відхилення розміру об'єкта показана на рис.13.4. При зміні розміру об'єкта 1 переміщенням штока 2 з конічною заслінкою змінюється величина кільцевого зазору в соплі робочого пневматичного перетворювача 3, і в його вимірювальній камері встановлюється тиск p_1 , відмінний від тиску P_2 у вимірювальній камері калібрувального пневматичного перетворювача 4. Різниця тиску $(p_1 - p_2)$ вимірюється і перетворюється індикатором 6 в зручний для реєстрації сигнал. Робота приладу забезпечується стабілізованим джерелом стиснутого повітря 7. Для настроювання на розмір за еталоном служить регульовальний гвинт 5.

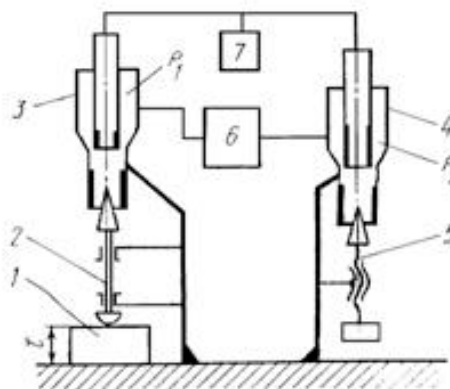


Рис. 13.4 - Схема диференціального пневматичного ежекторного приладу для лінійних вимірювань

Ціна поділки шкали пневматичних приладів для вимірювання довжини низького тиску становить від 0,5 до 5 мкм. Розроблені пневматичні прилади низького і високого тисків з якнайменшою ціною розподілу 0,1 мкм і широким діапазоном вимірювань. Пневматичні прилади дозволяють здійснювати дистанційний контроль, а в поєднанні з механіко-електричними вимірювальними перетворювачами автоматизувати процес реєстрації результатів вимірювання.

13.3.3.Індуктивні вимірювальні прилади

Індуктивні прилади відрізняються високою точністю, придатні для ведення дистанційних вимірювань, що дозволяє за необхідності автоматизувати процес обробки результатів вимірювань. У індуктивних

перетворювачах використовується властивість котушки індуктивності змінювати свій реактивний опір при зміні деяких її параметрів. Для цього один з елементів магнітного ланцюга (якір) виконується рухомим, і від його положення щодо нерухомої частини залежить магнітний опір ланцюга, а отже, й індуктивний опір котушки. Переміщення якоря зв'язується з вимірюваною лінійною або кутовою величиною, при цьому змінюється або повітряний зазор, або площа перетину повітряного зазору площиною, перпендикулярною до вектора магнітної індукції.

Для підвищення чутливості індуктивні перетворювачі виконуються диференціальними з підключенням обох котушок у вимірювальну (наприклад, мостову) схему. На рис. 13.5 показана схема індуктивного приладу з диференціальним перетворювачем.

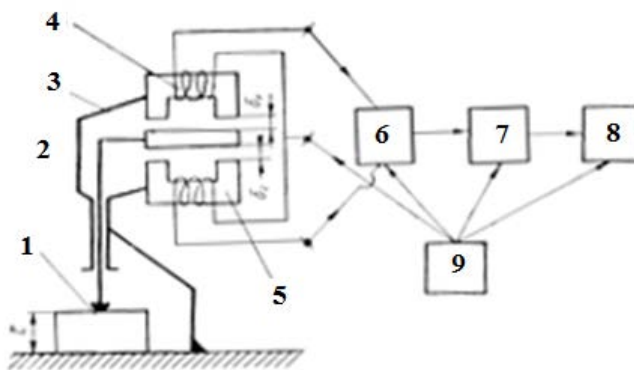


Рис. 13.5. Схема індуктивного приладу з диференціальним перетворювачем

При дії об'єкта вимірювань 1 на шток 2 змінюються зазори δ_1 і δ_2 між якорем 3 і магнітопроводами з котушками 4 і 5, які підключені до мостової вимірювальної схеми 6. Сигнал розузгодження через підсилювач 7 подається на індикатор (показуючий або записуючий пристрій) 8. Для роботи приладу необхідне джерело живлення 9.

Індуктивні перетворювачі із змінним зазором мають нелінійну характеристику, тому діапазон вимірювання приладами з таким перетворювачем невисокий (0,1–0,3 мм). Індуктивні перетворювачі із змінною площею зазору мають лінійну характеристику, але відносно невисоку чутливість. Їх можна використовувати для вимірювання великих відхилень лінійних або кутових величин. Переважне використання аналого-цифрових перетворювачів в індикаторах. Для вимірювання лінійних або кутових величин із значним діапазоном відхилень застосовують індуктивні прилади з диференціальним перетворювачем соленоїдного типу (рис.13.6а).

Соленоїдний перетворювач складається з двох котушок 4 і 2, усередині яких поміщене феромагнітне осердя (якір) 3. При переміщенні якоря уздовж

осі котушок індуктивність останніх змінюється. Характеристика соленоїдного перетворювача лінійна, а вимірювальні зусилля незначні.

В існуючих приладах з підсилювачами ці перетворювачі дозволяють одержати ціну поділки від 0,05 до 1 мкм і межі вимірювання від дуже малих (± 3 мкм) до відносно великих ($\pm 1,5$ мм) [6].

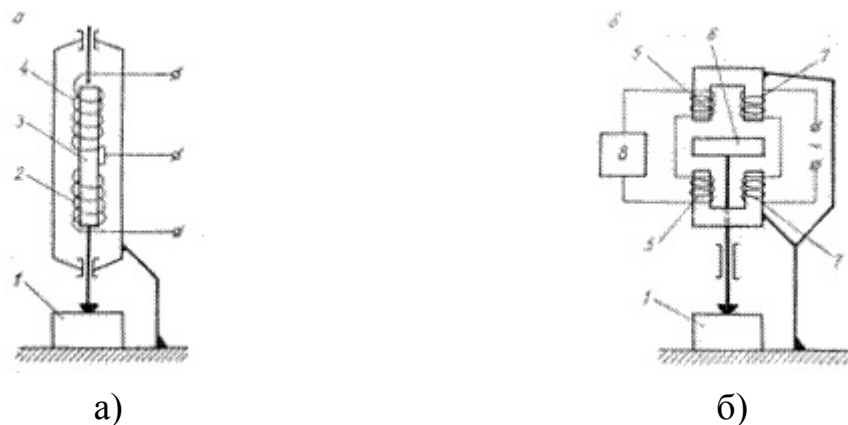


Рис. 3.6 - Диференціальні індуктивні перетворювачі: а - соленоїдного типу; б - трансформаторного типу

В індуктивних трансформаторних перетворювачах (рис.13.6,б) використовується залежність індуктивного зв'язку між котушками 5 і 7 від положення якоря 6. При симетричному розміщенні якоря струм у вимірнику 8 дорівнює нулю, оскільки первинні котушки 7 (і аналогічно вторинні 5) однакові і включені послідовно. При переміщенні якоря під дією об'єкта вимірювання I із середнього положення магнітні опори, а отже, і магнітні потоки, пронизуючі вторинні котушки, будуть неоднаковими, і у вимірнику з'явиться сигнал, пропорційний різниці індукованих у вторинних котушках е.р.с.

Механотрони та їх особливості. Механотрон (рис. 13.7) є вимірювальним перетворювачем високої чутливості. Він є діодом з катодом, що підігрівається, причому відстань δ між катодом K і анодом A змінюється внаслідок змін вимірюваного розміру об'єкта 3 на величину δ . Переміщення анода передається важелем 2 , закріпленим на мембрані 1 .

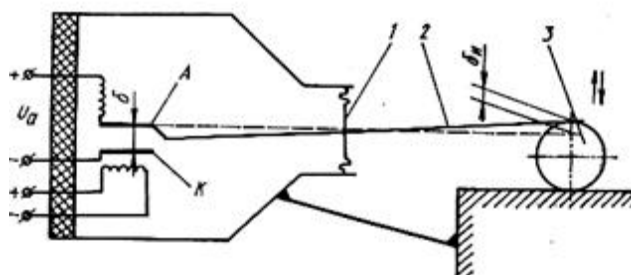


Рис. 13.7. Кінематична схема механотрона

Для підвищення чутливості застосовують, як правило, подвійні діоди. У цьому випадку зменшується вплив коливань живильної напруги і температури. Такі механотрони, включені у мостову вимірювальну схему, при відносно невеликих габаритах (30x80 мм) мають діапазон вимірювань $\pm 0,1$ мм, вимірювальне зусилля $\pm 100 \mu\text{N}$ і варіації показань у межах $\pm 0,04$ мкм.

13.3.4. Оптико-механічні і оптичні прилади

Для контролю лінійних і кутових величин застосовуються оптиметри, оптичні довжиноміри, вимірювальні мікроскопи, катетометри, ділильні головки і столи, інтерферометри.

Оптиметри працюють за принципом оптичного важеля. При переміщенні вимірювального наконечника зображення шкали з ціною поділки 1 мкм, спостережуване в окуляр, зміщується щодо нерухомого індексу. В оптичних довжиномірах для підвищення точності відліку застосовується окулярний спіральний мікрометр.

Вимірювальні мікроскопи призначені для вимірювання у прямокутних і полярних координатах лінійних і кутових розмірів різальних виробів, різального інструменту, профільних шаблонів та інших виробів, а також відстаней між осями отворів і т.п.

У більшості мікроскопів використовуються проєкційний метод вимірювання (у прохідному і відображеному світлі), метод осьового перетину (за допомогою вимірювальних ножів) або контактний спосіб. Вимірювана деталь може базуватися в центрах або на склі столу.

Ціна розподілу шкал мікроскопів: відлікової системи вимірювання довжини – від 0,005 до 0,001 мм, кутомірної головки - 1', ноніуса круглого столу - від 30" до 5'.

Катетометри застосовуються для вимірювання лінійних розмірів виробів, не доступних для безпосереднього вимірювання. Візирна труба послідовно наводиться на початок і кінець вимірюваного відрізка. Переміщення труби, визначуване на шкалі за допомогою ноніуса або мікроскопа, дорівнює довжині вимірюваного відрізка.

Для вимірювання центральних кутів і довжини у полярних координатах застосовуються оптичні ділильні головки.

Ціна розподілу у них від 2" до 1'. Вимірювані об'єкти закріплюються у шпинделі головки або у центрах. Для тих самих цілей, що й ділильні головки, застосовують оптичні ділильні столи. Ціна розподілу відлікової шкали у

ділильних столів від 1' до 20". Роль фіксатора при вимірюваннях кутів виконують індикатори годинникового типу, вимірювальні головки або автоколіматори.

З усіх джерел випромінювання оптичного діапазону газові лазери характеризуються найбільшим ступенем когерентності і монохроматичності випромінювання, що генерується ними.

Крім того, газові лазери можуть тривалий час працювати при кімнатній температурі без спеціальних пристроїв охолодження, малочутливі до зміни температури навколишнього середовища, а випромінюваний ними промінь має малий кут розходження (від 20" до 3').

Лазерний інтерферометр (рис. 13.8), призначений для вимірювання довжини і лінійних переміщень, показаний на рис.13.8. Випромінювання одночастотного лазера 8 через коліматор 9 йде на світлорозподільний кубик 10, який спрямовує частину випромінювання на рухоме дзеркало, пов'язане з об'єктом вимірювання 1, а іншу частину - на нерухоме дзеркало 11. Відображені від цих дзеркал становлячи випромінювання інтерферують на відокремлюючій площині кубика 2 і через регульовані щілисті діафрагми 7 і 3 прямують на фотоприймачі 4 і 6.

Завданням фотоприймачів є перетворення коливань інтенсивності освітленості, що сприймаються у вигляді інтерференційних смуг, у відповідну зміну електричного сигналу на їх виході, яке фіксується відліковим пристроєм 5. Відліковий пристрій забезпечує посилення і формування електричних сигналів обох каналів, зсунутих за фазою на $\pi/2$, їх аналого-дискретне перетворення на фоточутливій логічній схемі і видачу на реверсивний лічильник сигналів на віднімання або складання залежно від співвідношення фаз обох каналів.

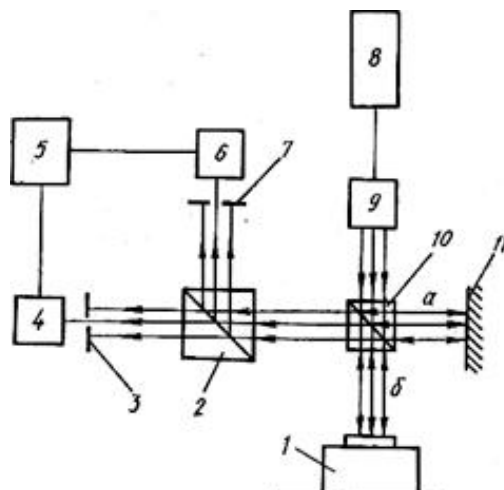


Рис. 13.8. Схема лазерного інтерферометра

Оптична схема інтерферометра забезпечує цикл зміни освітленості фотоприймача при зміні оптичної довжини плеча на половину довжини хвилі випромінювання.

Для вимірювання щодо великих переміщень застосовують інтерферометри з кутовими відбивачами. При цьому забезпечується паралель падаючого і відображеного проміння світла і стабілізується просторовий зсув фаз. Нахил кутових відбивних призм до 4° не вносить вагомих помилок в результати вимірювань. Дрейф характеристик фотоприймачів, нулів постійного струму і порогів спрацьовування формувальних пристроїв, а також зміна рівня потужності випромінювання обумовлюють зниження надійності і стабільності одно частотних інтерферометрів.

Двочастотні лазерні інтерферометри на відміну від одночастотних після включення володіють практично миттєвою готовністю до роботи. Для них не вимагається посилення вихідного сигналу фотоприймача підсилювачем постійного струму, оскільки постійна складова вихідного сигналу фотоприймача не впливає на роботу приладу.

Оптико-електронний вимірювальний пристрій може бути безконтактним лише у тому випадку, якщо поверхня вимірюваної деталі включена в оптичну систему як один з його елементів.

У такому разі виключається або обмежується можливість застосування інтерференційних методів, оскільки шорсткість поверхні деталі обумовлює значне спотворення інтерференційного поля і у багатьох випадках неможливість його утворення.

Цих недоліків не має пристрій, де використовується геометричне кодування вимірювальної інформації (рис.13.9). Конструктивно воно виконане у вигляді двох окремих блоків: оптико-електронного перетворювача і цифрового блока.

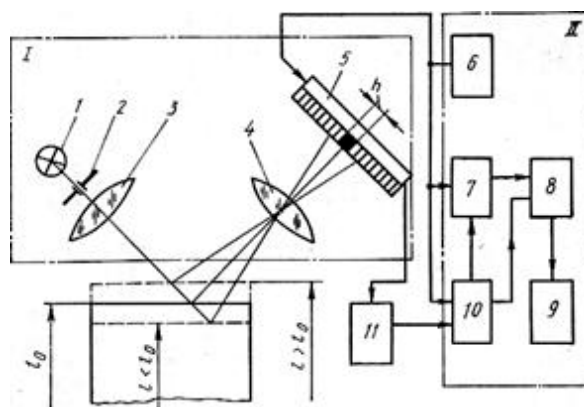


Рис. 13.9. Оптико-електронний пристрій для вимірювання лінійних розмірів

У оптико-електронному перетворювачі використаний лінійний формувач відеосигналів (ЛФВС) типу А-1034, що має 1024 світлочутливі елементи розміром 15х15 мкм.

Пристрій працює таким чином. Освітлювач 1 за допомогою щілистої діафрагми 2 і проєкційного об'єктива 3 створює на поверхні вимірюваної деталі світловий штрих. Зображення цього штриха через приймальний об'єктив 4 потрапляє на світлочутливу поверхню ЛФВС 5, в якому відбувається перетворення світлового потоку в електричний сигнал.

При вимірюванні розміру деталі, більшого або меншого від номінального, світловий штрих відхилятиметься в той або інший бік від нульового положення, засвічуючи світлочутливі елементи з меншими або більшими порядковими номерами. У блоці 10 відбувається визначення положення середини світлового штриха на ЛФВС. Блок усереднювання 7 дозволяє набувати середніх значень розміру за результатами декількох вимірювань (до десяти). У блоці 8 обчислюється фактичний розмір деталі, який потім у цифровій формі відображається в блоці індикації 9. Роботою приладу керує тактовий блок керування 6, який забезпечує накладення електричних зарядів на світлочутливих елементах залежно від енергії падаючого на них світлового потоку та їх відведення на приймальний блок.

Якщо висота мікронерівностей поверхні деталі R_z становить від 40 до 0,1 мкм, то прилад забезпечує лінійну залежність між сигналами на вході і виході у межах 4 мм, похибка вимірювання 0,01 мм і час вимірювання не більше 0,1 с.

13.3.5. Акустичні вимірювальні прилади

В акустичних приладах використовують коливання ультразвукового діапазону і невеликої інтенсивності (менше 1 кВт/см²). Акустичні прилади застосовуються в основному для вимірювання товщини, коли немає доступу до однієї з протилежних поверхонь виробу.

З відомих методів акустичного контролю для вимірювань товщини застосовують луну-метод і рідкий резонансний метод. У першому випадку вимірюється час проходження ультразвукового імпульсу через шар, товщину якого вимірюють, або амплітуда і фаза відображених коливань. У другому вимірювання товщини базується на явищі резонансу в контрольованому виробі або інших інтерференційних явищах при проходженні акустичних хвиль.

Ехоімпульсні товщиноміри застосовуються для вимірювання виробів з чисто обробленими паралельними поверхнями (група А) і грубо обробленими непаралельними поверхнями (група Б). Мінімальна товщина плоских виробів (або стінок), вимірювана приладами групи А, становить 0,2-0,3 мм при абсолютній похибці вимірювання не більше 10 мкм. Товщина вимірюваних стінок труб повинна бути не менше 1 мм.

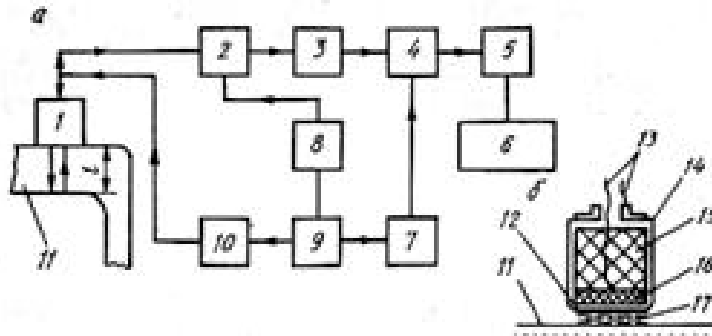


Рис. 13.10. Ехоімпульсний товщиномір: а - блок-схема; б - схема суміщеного п'єзоелектричного шукача

Мінімальна товщина, вимірювана приладами групи В, становить 1,2-1,5 мм при абсолютній похибці вимірювання 0,1-0,2 мм. Максимальна вимірювана товщина - 20-100 мм.

Блок-схема ехоімпульсного товщиноміра показана на рис. 13.10 а. Імпульс ультразвукового випромінювання генератора зондуючих імпульсів, пройдений від шукача 1 шлях L, відображається протилежним боком стінки виробу 11 і повертається у шукач 1, звідки передається в приймач 2. Підсилювач 3 передає відображений сигнал у вимірювальний тригер 4, тривалість імпульсу якого дорівнює часу проходження ультразвукових хвиль у виробі. Для цього у тригер 4 надходить також сигнал від генератора розгортки 7. Блок тимчасового регулювання чутливості 8 призначений для зменшення чутливості приймача 2 у момент випромінювання зондуючого імпульсу і для відновлення її. Блоки 7, 10 і 8 керуються синхронізатором 9. Він забезпечує одночасний (або із затримкою на певний час) запуск генераторів зондуючого імпульсу 10 і розгортки 7.

При вимірюванні малої товщини тривалість вихідного імпульсу вимірювального тригера дуже мала. Тому для підвищення точності вимірювання використовують блок множення інтервалу 5. У блоці індикації 6 застосовують стрілкові або цифрові індикатори тривалості імпульсу, вимірювального тригера, використовуючи перетворювач час-напруга. Шукач 1 перетворює електромагнітні коливання в ультразвукові, випромінює

ультразвукові хвилі у виріб, приймає відображені хвилі і перетворює їх в електромагнітні.

Схема суміщеного п'єзоелектричного шукача наведена на рис.13.10 б. П'єзопластина 16 приклеєна або притиснута до демпфера 15. Між п'єзопластиною і виробом 11, в який виробляється випромінювання, може розміщуватися декілька тонких проміжних шарів - один або декілька протекторів 12 і прошарок змащувального матеріалу 17. Шукач розміщений у корпусі 14. Виводи 13 сполучають п'єзопластину з генератором 10 і приймачем 2.

П'єзопластина, як правило, має товщину, що дорівнює половині довжини ультразвукової хвилі у п'єзоматеріалі. На протилежних поверхнях пластини розміщуються металеві електроди для підведення змінних електричних зарядів. Демпфер служить для гасіння вільних коливань п'єзопластини, тобто для отримання коротких імпульсів, а також для попередження механічних пошкоджень пластин.

Протектор є пластинкою завтовшки 0,1-0,5 мм з кварцу, сапфіра або смоли з наповнювачем, приклеєною до п'єзоелемента. Він служить для поліпшення акустичного контакту з виробом і захисту п'єзоелемента від абразивного зношування. Корпус забезпечує екранування п'єзоелемента і виводів від магнітних полів.

Запитання для самоконтролю до теми 13

1. Які Ви знаєте прийоми для виміру геометричних розмірів тіла?
2. Що Ви розумієте під геометричними величинами?
3. Яким чином вимірюються лінійні розміри тіла?
4. Які види похибок Ви знаєте?
5. Як розраховуються похибки при вимірюванні?

Тема 14. Вимірювання тиску

План

- 14.1 Загальна класифікація
- 14.2. Рідинні засоби вимірювання тиску
- 14.3. Деформаційні прилади для вимірювання тиску
- 14.4 Установка і обслуговування деформаційних трубчасто–пружинних манометрів
- 14.5 Засоби вимірювання теплоти згорання рідких і газоподібних палив

14.1 Загальна класифікація

Тиском називають відношення сили, що діє перпендикулярно поверхні, до площі цієї поверхні. Тиск A – одна з основних величин, що визначає термодинамічний стан речовин. Тиском багато в чому визначається хід технологічного процесу, стан технологічних апаратів і режими їхнього функціонування. Із завданням вимірювання тиску доводиться зіштовхуватися при вимірюваннях деяких технологічних параметрів, наприклад витрати газу або пари, при термодинамічних параметрах, що змінюються, рівня рідини.

Розрізняють наступні основні види тиску: атмосферний, абсолютний, надлишковий і вакуум (розрідження).

Атмосферний (барометричний) тиск (P_b) – тиск, створюваний масою повітряного стовпа земної атмосфери. Він має змінне значення, що залежить від висоти місцевості над рівнем моря, географічної широти і метеорологічних умов (погоди).

Надлишковий тиск (P) – різниця між абсолютним і барометричним тисками.

Абсолютний тиск (P_a) – тиск, відлічений від абсолютного нуля. За початок відліку абсолютного тиску приймають тиск усередині посудини, з якої повністю видалене повітря.

Абсолютний тиск P_a середовища може бути більше або менше атмосферного. У першому випадку абсолютний тиск дорівнює сумі атмосферного і надлишкового тисків:

$$P_a = P_g + P \quad (14.1)$$

У другому випадку абсолютний тиск менше атмосферного на величину вакуум метричного тиску, тобто:

$$P_a = P_0 - P \quad (14.2)$$

В окремому випадку, коли P або P_v дорівнює нулю, абсолютний тиск дорівнює атмосферному.

Вакуум (розрідження) (P_v) – різниця між барометричним і абсолютним тисками. Іноді вакуумметричний тиск виражають у вигляді відносної величини V у відсотках атмосферного тиску:

$$V = \frac{P_a}{P_0} \cdot 100\% \quad (14.3)$$

Статичний тиск (P_c) потоку може бути надлишковим або вакуумметричним, в окремому випадку він може бути дорівнювати атмосферному.

Повний тиск середовища, що рухається (P_{Π}) складається зі статичного (P_c) і динамічного (P_d) тисків:

$$P_{\Pi} = P_c + P_d \quad (14.4)$$

Динамічний тиск (P_d) (Π_a), що залежить від швидкості потоку (швидкісний напір) для рідини, а також для газу і пари при помірних швидкостях визначається по формулі:

$$P_d = \frac{(v \cdot \rho)}{2} \quad (14.5)$$

де v – швидкість руху речовини, м/с; ρ – густина речовини, кг/м³.

У Міжнародній системі одиниць (SI) за одиницю тиску прийнятий паскаль (Па) – тиск, створюваний силою в 1 ньютон (Н), рівномірно розподіленої по поверхні площею 1 м² і спрямованої нормально до неї.

Несистемна одиниця тиску (1 кгс/см²) дорівнює тиску на площу 1 см² сили в 1 кгс, де 1 кгс – сила, що надає масі в 1 кг нормальне прискорення вільного падіння в 9,81 м/с². Одиниця тиску системи МКГСС (метр, кілограм – сила, секунда) дорівнює 1 кгс/м².

У рідинних приладах з водяним або ртутним заповненням скляних трубок вимірювання тиску виконується в міліметрах водяного або ртутного стовпа (мм.вод.ст. або мм.рт.ст.). Значення, обмірювані в цих одиницях, звичайно відносять до нормального прискорення вільного падіння тіл і нормальній температурі, рівної для води 4°C і ртуті 0°C. Неважко встановити, що тиск в 1 мм.вод.ст. дорівнює тиску в 1 кгс/м².

Несистемна одиниця тиску – бар, дорівнює тиску $1 \cdot 10^5$ Па або 1,01972 кгс/см². Ця одиниця зручна в тім відношенні, що числа, що виражають тиск у барах і кгс/см², відрізняються між собою не більше ніж на 2%.

Через те що зазначені одиниці – кгс/см², мм.вод.ст., мм.рт.ст. і бар – у цей час мають поширення, вони тимчасово допускаються до застосування поряд з одиницями системи SI.

В англійських мірах одиницею тиску є 1 англ. фунт-сила (4,45 Н) на 1 кв. дюйм (0,645·10⁻³ м²), рівна 6890 Па.

Співвідношення між одиницею тиску системи SI і колишніми наведені в табл.14.1.

Таблиця 14.1.

Співвідношення між одиницями тиску

Одиниця тиску	Па(Н/м ²)	бар	кг/см ²	кгс/м ²	мм.рт.ст.
Па (Н/м ²)	–	1x10 ⁻⁵	10,2 x10 ⁻⁵	0, 102	7,5 x 10 ⁻³
бар	1 x 10 ⁵	–	1,02	10,2 x 10 ³	1,02 x 10 ⁴
кг/см ²	98,1 x 10 ³	0,981	–	1 x 10 ⁴	750
кгс/м ²	9,81	98,1 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁴	–	735,6
мм.рт.ст.	133,3	1,333 x 10 ⁻⁵	1,36 x 10 ⁻⁵	13,6	–

Для наближеного перерахування тиску, вираженого в кгс/см² і кгс/м², у тиск, виражений відповідно в МПа і Па, необхідно в першому випадку числове значення зменшити в 10 разів, а в другому – збільшити в 10 разів. Так, наприклад, тиск в 100 кгс/см² відповідає тиску в 10 МПа, а тиск в 100 кгс/м² – тиску в 1000 Па.

Засоби вимірювання тиску класифікують по виду вимірювального тиску і принципу дії. По виду вимірювального тиску засоби вимірювання підрозділяють на:

- манометри надлишкового тиску - для вимірювання надлишкового тиску;
- манометри абсолютного тиску - для вимірювання тиску, відліченого від абсолютного нуля;
- барометри - для вимірювання атмосферного тиску. Барометри розділяються на ртутні і мембранні;
- вакуумметри - для вимірювання вакууму (розрідження);
- мановакуумметри - для вимірювання надлишкового тиску і вакууму (розрідження).

Крім перелічених засобів вимірювання у практиці вимірювання одержали поширення:

- напороміри – манометри рсих надлишкових тисків (до 40 кПа);
- тягоміри – вакууметри з верхньою межею вимірювання не більше – 40 кПа;
- тягонапороміри – мановакууметри з діапазоном вимірювання +20... –20 кПа;
- вакууметри залишкового тиску – вакууметри, призначені для вимірювання глибокого вакууму або залишкового тиску, тобто абсолютних тисків менш 200 Па;
- диференційні манометри – прилади вимірювання різниці тисків.

За принципом дії засоби вимірювання тиску підрозділяють на:

- рідинні,
- поршневі,
- деформаційні (пружинні),
- іонізаційні,
- теплові,
- електричні.

Така кваліфікація не є вичерпною і може бути доповнена засобами вимірювання, заснованими на інших фізичних явищах.

Найбільша кількість приладів, які застосовуються для вимірювання тиску, є манометрами надлишкового тиску. У цей час існує великий парк приладів вимірювання тиску, що дозволяє здійснити вимірювання тиску в діапазоні $10^{-12} \dots 10^{11}$ Па.

Далі розглянуті прилади вимірювання тиску, широко застосовувані в якості робочих при технологічних вимірюваннях.

14.2. Рідинні засоби вимірювання тиску

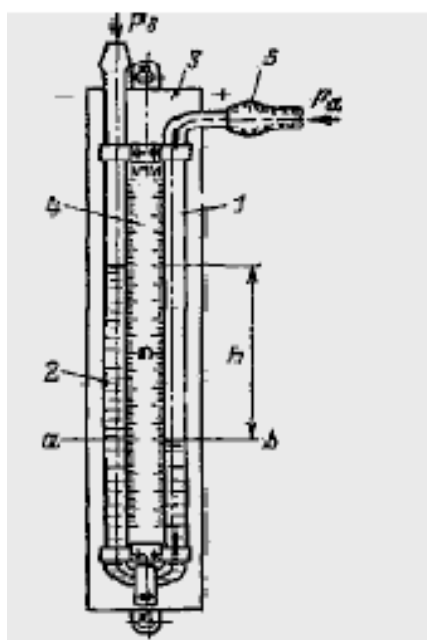
Для рідинних манометрів величиною, що характеризує вимірювальний тиск, служить видима висота стовпа (рівень) рідини, який врівноважується, у скляній вимірювальній трубці. До приладів цього виду відносяться однотрубні (чашкові) і двотрубні (U –образні) манометри. До числа рідинних засобів вимірювання тиску (різниці тисків і розрідження) з гідростатичним зрівноважуванням, які ще застосовуються у технологічних процесах, відносяться поплавкові і колокольні дифманометри.

Рідинні манометри є досить простими і точними приладами, що служать для визначення невеликих надлишкових тисків, що не перевищують 0,2 МПа. Вони широко застосовуються при дослідницьких і

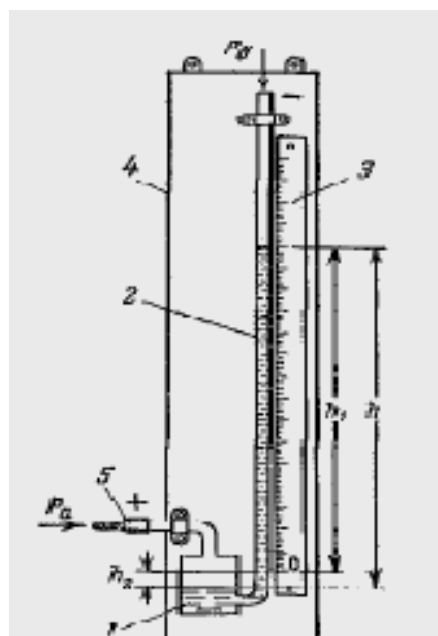
налагоджувальних роботах. У цих манометрах у якості врівноважувальної рідини використовують ртуть, дистильовану воду або етиловий спирт.

У цей час номенклатура рідинних засобів вимірювання тиску з гідростатичним зрівноважуванням істотно обмежена. У більшості випадків вони замінені більше удосконаленими деформаційними засобами вимірювання.

Двотрубні манометри. Найбільше часто застосовується двотрубний манометр (рис.14.1), що складається зі скляних вимірювальних трубок 1 і 2, з'єднаних унизу і закріплених на вертикальній підставі 3. Між трубками поміщена міліметрова шкала 4 з нульовою оцінкою посередині. Вимірювальні трубки заповнюються рідиною, що врівноважує, до нульової відмітки шкали. Трубка 1 з'єднана гумовою трубкою 5 з вимірювальним середовищем, яке перебуває під абсолютним тиском P_a , а трубка 2 – з атмосферою, яка має тиск P_b . Як правило, трубка 1, зв'язана із середовищем більшого тиску, позначається знаком “+” (плюсова трубка), а трубка 2, зв'язана із середовищем меншого тиску, позначається знаком “-” (мінусова трубка).



а)



б)

Рис. 14.1. Двотрубний (а) та однотрубний (б) манометри

При включенні манометра вимірювальний тиск врівноважується стовпом рідини висотою h , який відлічується по шкалі приладу.

Внаслідок того, що рівень рідини в трубці 1 понизиться, а в трубці 2 відповідно зросте, то загальна висота стовпа h буде дорівнювати сумі поділок, позначених на шкалі вище і нижче нульової поділки.

Якщо рідиною, що врівноважує, служить вода або спирт, то відлік показань проводиться по нижній границі меніска, а якщо ртуть – те по верхній. Тоді тиск визначається як:

$$P = h \cdot \rho \cdot g \quad (14.6)$$

Таким чином, при вимірюванні надлишкового тиску висота стовпа рідини, що врівноважує, не залежить від площі отвору вимірювальних трубок.

З рівняння (14.6) видно, що для обмеження висоти трубок манометра, обмежується міцністю і зручністю відліку, і не повинно перевищувати 1,5 м, при вимірюванні надлишкових тисків 0,015...0,2 МПа варто застосовувати рідину, що врівноважує, з великою густиною (ртуть), а при більше низьких тисках – з малою (вода, спирт і ін.).

Випускаються двотрубні манометри з діапазоном показань 100, 160, 250, 400, 600 і 1000 мм стовпа рідини.

При вимірюванні тиску двотрубним манометром представляє незручність відлік рівнів рідини одночасно в обох вимірювальних трубках. При значних коливаннях вимірювального тиску це утрудняє точне визначення показань приладу. У таких випадках для зменшення коливань рівнів рідини застосовують місцеве звуження перетину сполучної лінії.

Однотрубні манометри.

На рис.14.1(б) показана схема однотрубного манометра, що відрізняється від двотрубного рис.14.1, б) тим, що замість другої вимірювальної трубки має широку посудину (чашку) 1. До нижньої частини посудини приєднана скляна вимірювальна трубка 2, поруч із якої закріплена міліметрова шкала 3. Прилад змонтований на вертикальній підставі 4. Посудина манометра контактує з вимірювальним середовищем трубкою 5. Вільний кінець вимірювальної трубки з'єднаний з атмосферою. Посудина і вимірювальна трубка заповнюються рідиною, що врівноважує, до нульової поділки шкали. У більшості випадків зниженням рівня рідини в посудині, тобто h_2 , можна зневажити і вважати $h \approx h_1$. Тоді:

$$P = h_1 \cdot \rho \cdot g \quad (14.7)$$

Похибка вимірювання однотрубним манометром вище, ніж двотрубним, зате більшою зручністю першого з них є вимірювання рівня рідини в одній трубці.

Мікроманометри. Розглянуті вище рідинні манометри непридатні для вимірювання невеликих тисків, рівних одиницям або десяткам міліметрів

висоти стовпа рідини, що врівноважує, тому що при цьому похибка стає досить значною. Так, наприклад, при вимірюванні стовпа висотою 10 мм і можливої помилці у відліку показань неозброєним оком в 1 мм відносна похибка складе 10%, що неприпустимо.

Для точних вимірювань невеликих тисків газу (повітря) знаходиться застосування широкий за інтервалом вимірювання рідинний мікроманометр із похилою трубкою. Цей прилад (рис.14.2) має широку металеву посудину 1, яка з'єднана гнучкою трубкою з вимірювальною скляною трубкою 2, закріпленою на міліметровій шкалі 3. Посудина контактує з вимірювальним середовищем гумовою трубкою 4. Установка рівня рідини на нульову поділку шкали проводиться гвинтом коректора 5, що переміщає в посудині поршень 6. За допомогою дугоподібної стійки 7 з отворами шкала з вимірювальною трубкою може бути закріплена під п'ятьма кутами нахилу до горизонталі. Прилад змонтований на трикутній плиті 8, постаченої для правильної установки двома гвинтовими ніжками 9 і двома взаємно перпендикулярними рівнями 10. Застосування похилої скляної трубки дозволяє, зменшивши кут α при тій же висоті стовпа рідини, збільшити його довжину, що підвищує точність відліку.

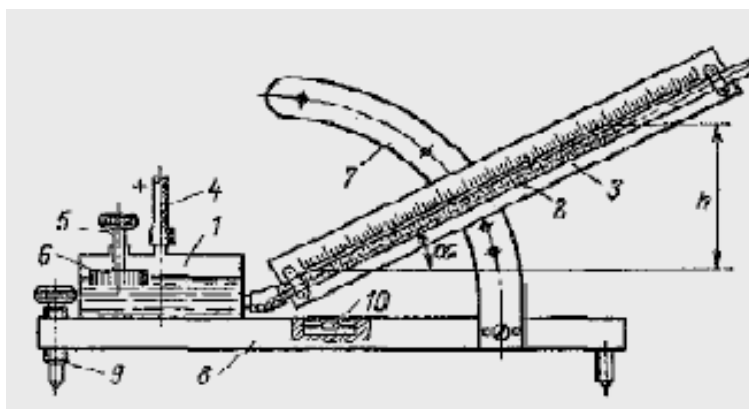


Рис. 14.2. Схема мікроманометру

Визначення тиску P (Па) за допомогою мікроманометра проводиться по формулі:

$$P = 0,001 \cdot l \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (14.8)$$

де l – довжина стовпа рідини, відлічуваної по шкалі приладу, мм.

Рідиною, що врівноважує, для мікроманометра служить етиловий спирт. Діапазон показань залежно від кута нахилу трубки при нормальному прискоренні вільного падіння тіл ($9,81 \text{ м/с}^2$) становить 600, 900, 1200, 1800 і 2400 Па. Клас точності мікроманометра 1. Прилад випускається на робочий тиск середовища 0,01 МПа.

Пристрій і виправлення до показань рідинних манометрів. На точність вимірювання тиску за допомогою рідинних манометрів впливають правильність установки приладу, відліку висоти стовпа і визначення густини рідини, що врівноважує.

Щоб уникнути перекручування результатів вимірювання, рідинні манометри закріплюються у вертикальному положенні по рівню в місцях, не підданих вібрації і нагріванню, і які перебувають поблизу місця відбору тиску.

Якщо манометр установлений вище або нижче місця відбору тиску, а сполучна лінія і простір над рідиною в плюсовій вимірювальній трубці або посудині заповнені іншою, більше легкою рідиною (наприклад, водою при вимірюванні ртутним манометром тиску води або пари), необхідно до показань приладу вводити виправлення, що враховує тиск, який створюється стовпом цієї рідини.

Абсолютна похибка вимірювання, що залежить від правильності відліку висоти стовпа рідини неозброєним оком, звичайно становить $\pm(0,5...1)$ мм. Застосування оптичних пристосувань (візуалізаторів) помітно зменшує цю похибку.

14.3. Деформаційні прилади для вимірювання тиску

Висока точність, простота конструкції, надійність і низька вартість є основними факторами, що обумовлюють широке розповсюдження деформаційних приладів для вимірювання тиску в промисловості і наукових дослідженнях.

Досить розповсюдженим видом деформаційних приладів, які використовуються для визначення надлишкового тиску, є трубчасто – пружинні манометри, що відіграють винятково важливу роль у технічних вимірюваннях. Ці манометри виготовляються з одновитковою трубчастою пружиною, що представляє собою вигнуту по окружності металеву пружну трубку овального перетину. Під дією вимірювального тиску усередині трубки вона частково розкручується внаслідок деформації її перетину, що прагне прийняти форму кола.

Вимірювальні прилади з одновитковою трубчастою пружиною призначені для вимірювання надлишкового тиску і розрідження неагресивних рідких і газоподібних середовищ.

Прилади цього типу випускаються тільки показуючими у звичайному, вібростійкому, антикорозійному, вогне – і вибухозахищеному виконаннях.

Однією з основних характеристик деформаційного чутливого елемента зазначених приладів є залежність переміщення δ робочої точки від діючого тиску P або різниці тисків. Ця характеристика $\delta=f(P)$, яка називається статичною, може бути лінійною або нелінійною. Хід статичної характеристики в межах пружної деформації неоднозначний і утворює петлю гістерезису. Значення гістерезису визначає систематичну похибку деформаційних засобів вимірювання.

Крім відзначеного недоліку чутливі елементи мають властивість пружної післядії, суть якого полягає в тому, що після припинення зміни тиску деформація продовжує зменшуватися, асимптотично наближаючись до граничного значення. Поряд із пружною післядією при експлуатації чутливих елементів має місце залишкова деформація, яка полягає в тому, що після зняття тиску чутливий елемент не повертається у вихідне положення. При багаторазових вимірюваннях залишкова деформація накопичується, що приводить до значних похибок.

Викладені особливості деформаційних чутливих елементів пояснюють той факт, що для технічних манометрів верхня межа вимірювання обмежується половиною тиску, що відповідає межі пропорційності статичної характеристики, у той час як для зразкових приладів межа вимірювання обмежується четвертою частиною тиску, що відповідає межі пропорційності.

Для передачі переміщення вільного кінця деформаційного чутливого елемента до покажчика манометра приєднані секторні і важільні передавальні механізми. За допомогою передавального механізму переміщення вільного кінця трубчастої пружини в кілька градусів або міліметрів перетворюється в кутове переміщення стрілки на 270–300°.

Важільний передавальний механізм застосовується в тих випадках, коли від манометра не потрібна висока точність вимірювання і він піддається вібрації. Секторний передавальний механізм застосовується в зразкових приладах і в приладах, де за умовами експлуатації виключена вібрація.

На рис.14.3 показана конструкція манометра із секторним передавальним механізмом. Прилад складається із трубчастої пружини 5, один кінець якої впаяний в отвір утримувача 1, а іншої (рухливий) кінець наглухо запаяний і несе на собі наконечник 10. Порожнина пружини пов'язана з вимірювальним середовищем через канал у утримувачі 1, об'єднаному з радіальним штуцером 14. Утримувач приладу оснащений платою 2, на якій монтується трибко – секторний механізм. Останній включає

зубчасте колесо (трибку) 8 і зубчастий сектор 9. Для виключення люфту в передавальному механізмі використовується спіральна пружина 7, один кінець якої за допомогою штифта кріпиться на осі трибки, а інший – до колонки 6, укріпленої на платі 2. До хвостовика сектора 9 за допомогою гвинта 12 кріпиться тяга 11. За допомогою тяги переміщення вільного кінця пружини передається зубчастому сектору, що має вісь обертання 13.

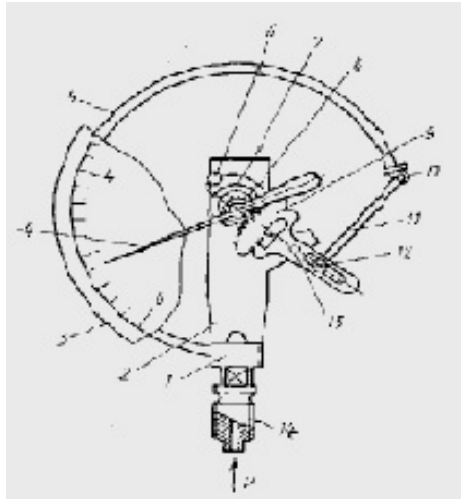


Рис. 14.3. Схема манометру з одновитковою трубчастою пружиною

Обертання зубчастого сектора передається на трибку, на осі якої насаджена стрілка 4 для відліку показань на шкалі 3. Шкала манометра рівномірна, тому що переміщення вільного кінця пружини пропорційно вимірювальному тиску. Регулювання ходу стрілки проводиться гвинтом 12.

Вакуумметр із одновитковою трубчастою пружиною конструктивно ідентичний розглянутому манометру. Відмінність складається тільки в шкалі і напрямку переміщення стрілки. У вакуумметрах переміщення стрілки може відбуватися як по годинній стрілці, так і проти. Відмінною рисою мановакуумметра є шкала, що виконується з нулем у середній частині.

Шкала, розташована ліворуч від нуля, служить для вимірювання вакууму, а шкала, розташована праворуч, – для вимірювання надлишкового тиску.

Діапазони вимірювання манометрів від 0...0,1 МПа до 0...103 МПа; вакуумметрів– від –0,1 до 0 МПа. Класи точності приладів: 0,4(0,5); 0,6; 1,0; 1,5(1,6); 2,5; 4,0.

Поряд з розглянутими приладами, оснащеними однаковою трубчастою пружиною, у практиці вимірювання тиску і розрідження одержали широке поширення манометри і вакуумметри, оснащеними електроконтактними пристроями, що сигналізують. Ці засоби вимірювання тиску одержали назву

електроконтактних. Клас точності електроконтактних манометрів і вакуумметрів 1,5. Похибка спрацьовування пристрою, що сигналізує, $\pm 2,5\%$.

Загальний вигляд манометра –сигналізатора електроконтактного типу показаний на рис.14.4.

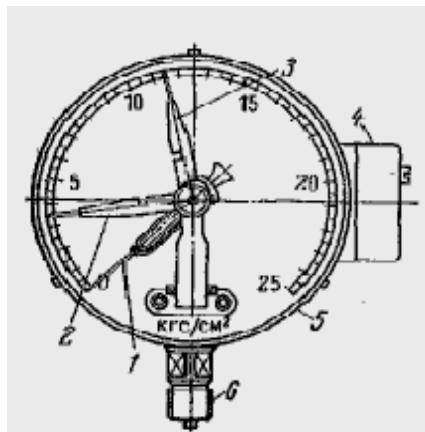


Рис. 14.4. Маноматр –сигналізатор

Прилад містить вказівну стрілку 1, сигнальні (мінімального і максимального тиску) стрілки 2 і 3, які установлюються на задані значення тисків за допомогою ключа, і коробці 4 із затискачами для приєднання до приладу ланцюга сигналізації. Механізм манометра вмонтований у корпус 5. Прилад контактує з вимірювальним середовищем через штуцер 6. При досягненні кожного із заданих граничних тисків контакт, пов'язаний із вказівною стрілкою, стикається з контактом, розташованим на відповідній сигнальній стрілці, і замикає ланцюг сигналізації.

Зазначені манометри придатні для вимірювання тисків, що плавно змінюються. Контактний пристрій їх живиться від мережі постійного або змінного струму, напругою 220 В. Розривна потужність контактів 10 В·А.

Вимірювальні прилади із сільфоним чутливим елементом. Прилади цього типу призначені для вимірювання надлишкового тиску, розрідження і різниці тисків. Їх виконують показуючими і самописними. Схема самописного сільфонного манометра показана на рис.14.5. Вимірювальний тиск через штуцер 11 подається в камеру 10, де розташований деформаційний чутливий елемент – сільфон 9.

Для збільшення твердості сільфона всередині нього розташована гвинтова пружина 8. Під дією тиску сільфон деформується і дно його піднімає шток 7, жорстко з'єднаного із двоплечим важелем 6, останній через систему важелів 5, 4, 3 повертає вісь 12 і укріплений на ній П-подібний

важіль 2. До П-подібного важеля прикріплена стрілка 1 з пером. Запис вимірювального тиску виконується на дисковій діаграмі, привод якої здійснюється за допомогою синхронного двигуна або годинного механізму. Верхня межа вимірювання сильфонних приладів обмежений тисками 0,025...0,4 МПа.

Класи точності сильфонних манометрів надлишкового тиску, вакуумметрів і мановакуумметрів: 1,5; 2,5. Для вимірювання різниці тисків і витрати рідких і газоподібних середовищ широке застосування одержали сильфонні дифманометри. Граничні номінальні перепади тисків становлять 0,0063...0,25 МПа. Граничний припустимий робочий надлишковий тиск: 6,3; 16 і 32 МПа.

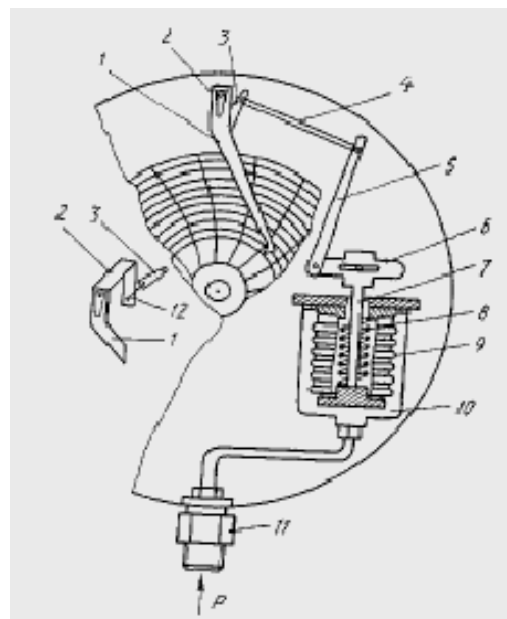


Рис.14.5. Схема самописного сильфонного манометру

Класи точності сильфонних показуючих і самописних дифманометрів 1,0 і 1,5. Зразкові манометри типу МО (рис. 14.6) застосовуються для перевірки промислових манометрів, а також для виконання точного вимірювання тиску в лабораторних установках. Прилади мають трубчасту пружину і зубчасто –секторний передавальний механізм, розташовані в металевому корпусі діаметром 160 або 250 мм. У зразкових манометрах застосовується пружина високої якості і ретельно виконаний передавальний механізм.

Прилади випускаються з кінцевим значенням шкали 1...600 кгс/см². Шкала має 100 умовних розподілів із числовими оцінками через кожні 5 розподілів. Для перерахування умовних розподілів у кгс/см² зразкові манометри забезпечуються перевідною таблицею або графіком.

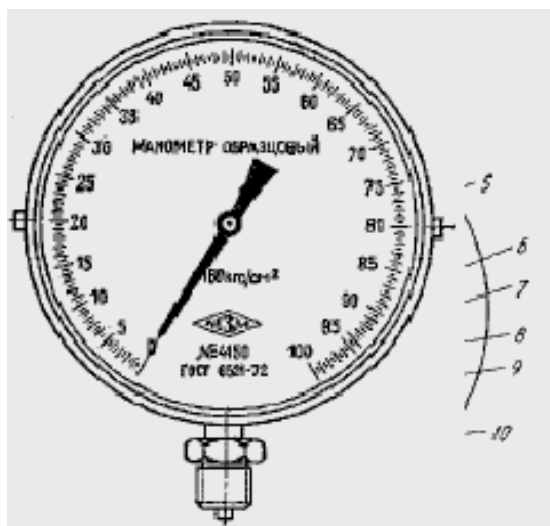


Рис. 14.6. – Зразковий манометр типу МО

Кінцеве значення тиску вказується на циферблаті приладу. Клас точності манометрів діаметром 250 мм – 0,16 і 0,25, а діаметром 160 мм – 0,4. Користування приладами допускається при температурі навколишнього повітря 10...35°C і відносній вологості до 80%.

Вимірювальні прилади з мембранним чутливим елементом. Ці прилади призначені для вимірювання атмосферного і надлишкового тисків і розрідження. Через малість зусиль, що розвиваються деформаційним чутливим елементом, мембранні прилади випускаються в основному показуючими. Принцип дії приладів складається в перетворенні вимірювального тиску або розрідження в переміщення твердого центра мембранного чутливого елемента, що за допомогою передатного трибко – секторного механізму перетворюється в обертовий рух покажчика. Максимальний діапазон вимірювання мембранних манометрів 0...2,5 МПа, вакуумметрів – від –0,1 до 0 МПа. Класи точності приладів 1,5 і 2,5. Крім розглянутих приладів випускаються мембранні тягоміри, напороміри і тягонапороміри класів точності 1,5; 2,5.

14.4. Установка і обслуговування деформаційних трубчасто–пружинних манометрів

При виборі манометра керуються насамперед необхідною точністю показань, з огляду на особливості приладу і умови вимірювання. Виходячи з надійності роботи манометра, кінцеве значення шкали вибирається з таким розрахунком, щоб воно перевищувало вимірювальну величину при постійному тиску або тиску, що плавно змінюється, в 1,5 рази, а при

змінному – в 2 рази. В обох випадках мінімальний вимірювальний тиск не повинний бути менше $1/3$ кінцевого значення шкали.

Показання трубчасто-пружинного манометра залежать від температури чутливого елемента, тому установка приладу виконується таким чином, щоб по можливості виключити вплив на нього температури вимірювального і навколишнього середовища. Температура повітря, що оточує прилад, не повинна перевищувати 40°C , тому манометри не можна встановлювати біля сильно нагрітих поверхонь. При установці манометра безпосередньо в місця вимірювання тиску пари або гарячої води для захисту приладу від надмірного нагрівання на сполучній лінії перед ним встановлюється кільцева або U-подібна сифонна трубка, що утворить гідравлічний затвор

Для установки манометру при робочому тиску середовища до 2,5 МПа застосовується триходовий пробковий кран, а вище – триходовий вентиль. Іноді в сполучній лінії розташовуються два вентиля: один для відключення приладу і інший – для з'єднання його з атмосферою. Манометр угвинчується штуцером у триходовий вентиль, з'єднаний з кільцевою сифонною трубкою, яка приварена до стінки труби. Права частина вентиля служить для включення манометра, а ліва – для продувки сифонної трубки, висота до якої береться не менш 350 мм.

У випадку застосування триходового крана манометр може бути з'єднаний з вимірювальним середовищем, а для відключення приладу або перевірки нульової оцінки шкали – з атмосферою. За допомогою цього ж крана здійснюється періодична продувка сполучної лінії. Напрямок каналів у пробці крана зазначено на торці рукоятки рисками. Деформаційні манометри повинні встановлюватися в місцях, не підданих вібрації і струсу, що шкідливо відбивається на роботі і стані приладів. Самописні манометри встановлюються строго вертикально.

З міркувань обмеження запізнювання показань довжина сполучної лінії до манометра звичайно не перевищує 50 м. Внутрішній діаметр мідної або сталеві трубки сполучної лінії вибирається в межах 3...15 мм залежно від її довжини. Сполучна лінія повинна бути щільною і прокладатися по найкоротшій відстані з ухилом 0,1 до манометра, що встановлюється, вище місця відбору тиску при вимірюванні тиску газу і нижче – при вимірюванні тиску рідини і пара. Якщо зазначена установка манометрів неможлива, то при вимірюванні тиску газу в нижніх точках сполучної лінії застосовуються відстійні посудини, а при вимірюванні тиску рідини і пари у верхніх точках –

газозбірники. Вигини лінії повинні бути плавними. Температура середовища в лінії перед манометром повинна рівнятися температурі навколишнього повітря. Як ущільнювальні прокладки при установці манометрів служать пароніт (до 6 МПа) і відпалена червона мідь (понад 6 МПа).

Правила вимірювання трубчасто –пружинними манометрами. Включення і вимикання манометрів варто робити повільно щоб уникнути ушкодження передавального механізму. Для запобігання у чутливому елементі появи залишкової деформації не можна допускати перевищення вимірювальним тиском кінцевого значення шкали.

Вимірювання швидко змінного тиску, наприклад після насосів, компресорів і т.п. спричиняє сильне зношування передавального механізму манометрів і затрудняє правильний відлік показань, тому для зменшення коливань вказівної стрілки в сполучній лінії встановлюють заспокійливі бачки або частково прикривають триходовий кран або вентиль.

Залежно від необхідної точності вимірювання до показань деформаційних манометрів вводяться в загальному випадку наступні поправки:

- основна – визначається за паспортом манометра;
- на розташування манометра щодо місця відбору тиску (якщо сполучна лінія заповнена рідиною) – залежить від висоти стовпа рідини в сполучній лінії і якщо буде потреба вводиться так само, як і при вимірюванні тиску рідинними манометрами;
- на температуру приладу – збільшення температури манометра вище нормальної змінює його показання у бік завищення вимірювального тиску.

Для точного визначення виправлення на температуру приладу необхідно знати його температурний коефіцієнт, значення якого для різних типів манометрів коливається в широких межах. Приблизно можна прийняти, що додаткова похибка трубчасто-пружинного манометра становить $\pm 0,4\%$ при відхиленні температури навколишнього повітря на кожні $\pm 10^\circ\text{C}$ від значення $20\pm 5^\circ\text{C}$ у діапазоні температур $0\dots 60^\circ\text{C}$.

Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску прямого перетворення. Вимірювальні перетворювачі тиску, які випускаються у даний час, засновані на методі прямого перетворення, розрізняються як видом деформаційного чутливого елемента, так і способом перетворення його переміщення або зусилля, яке розвивається ним, у сигнал

вимірювальної інформації. Для перетворення переміщення чутливого елемента в сигнали вимірювальної інформації широко застосовуються індуктивні, диференційно-трансформаторні, ємнісні, тензорезисторні і інші перетворювальні елементи.

Перетворення зусилля, яке розвивається чутливим елементом, у сигнали вимірювальної інформації здійснюється п'єзоелектричними перетворювальними елементами.

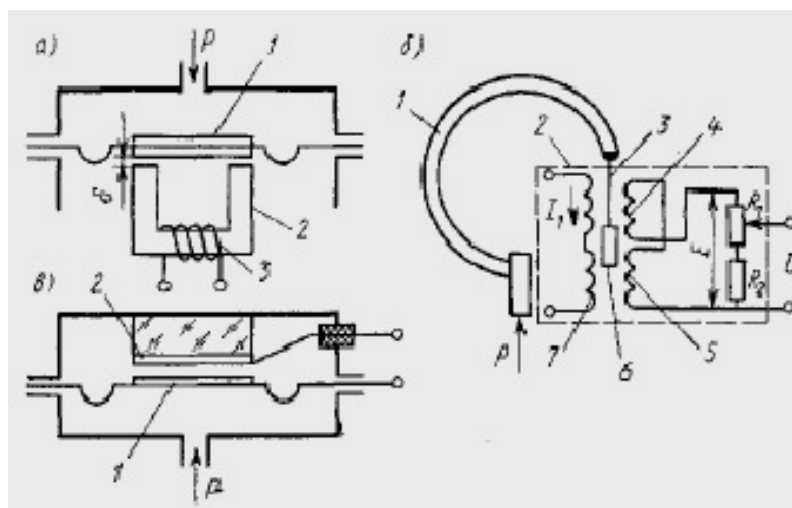


Рис. 14.6. – Схема вимірювальних перетворювачів тиску

Індуктивні вимірювальні перетворювачі тиску. На рис.14.7,а показана схема вимірювального перетворювача тиску, оснащеного перетворювальним елементом індуктивного типу. Мембрана 1, що сприймає тиск, є рухливим якорем електромагніта 2 з обмоткою 3. Під дією вимірювального тиску мембрана 1 переміщується, що викликає зміну електричного опору індуктивного перетворювального елемента.

Диференційно–трансформаторні вимірювальні перетворювачі тиску.

Вимірювальний перетворювач тиску диференційно –трансформаторного (ДТ) типу (рис.14.6,б) містить деформаційний чутливий елемент 1 і ДТ–елемент 2. Перетворювальний елемент являє собою каркас із діелектрика, на якому розміщені котушка з первинною обмоткою 7, що складається із двох секцій, згідно намотаних, і двох секцій 4, вторинні обмотки 5, включених зустрічно. Усередині каналу котушки розташований рухомий сердечник 6 з магнітом якого матеріалу, пов'язаний із пружиною 1 тягою 3.

Шляхом зміни регульованого опору R_1 можна змінювати межі вимірювання на $\pm 25\%$.

Формування вихідного сигналу ДТ–елемента здійснюється в такий спосіб. При протіканні по первинних обмотках струму виникають магнітні

потоки, що пронизують обидві секції вторинної обмотки і індуює в них ЕРС. Значення цього ЕРС пов'язані із взаємними індуктивностями між первинною обмоткою і кожною із секцій вторинної обмотки.

Перетворення вимірювального тиску в електричні сигнали розглянутим перетворювачем тиску здійснюється шляхом перетворення тиску в деформацію (переміщення) чутливого елемента, жорстко з'єданого із сердечником 6, і наступного перетворення переміщення сердечника 6 в електричний сигнал ДТ–елементом. Класи точності 1,0 і 1,5.

Для вимірювання перепаду тисків розроблені мембранні дифманометри із ДТ–елементом, що здійснює перетворення переміщення мембранного блоку в сигнал вимірювальної інформації.

Класи точності перетворювачів перепаду тиску 1,0 і 1,5. Час установлення вихідних сигналів не більше 1 с.

Ємнісні вимірювальні перетворювачі тиску.

Схема вимірювального перетворювача тиску, оснащеного ємнісним перетворювальним елементом, наведена на рис.14.6,в. Вимірювальний тиск сприймається металевою мембраною 1, що є рухливим електродом ємнісного перетворювального елемента. Нерухомий електрод 2 ізолюється від корпусу за допомогою кварцових ізоляторів. По залежності ємності С перетворювального елемента від переміщення δ мембрани 1 вимірюється величина тиску.

Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі тиску. Перетворювачі тиску цих видів являють собою деформаційний чутливий елемент, найчастіше мембрану, на яку наклеюються тензорезистори. В основі принципу роботи тензорезисторів лежить явище тензоефекту, суть якого полягає в зміні опору провідників і напівпровідників при їхній деформації. Існує зв'язок між зміною опору тензорезистору і його деформацією

Отримали розповсюдження дровові і фольгові тензорезистори, що виготовляють із провідників типу манганіну, ніхрому, константану, а також напівпровідникові тензорезистори, що виготовляють із кремнію і германія р– і n–типів. Опір тензорезисторів, що виготовляють із провідників, становить 30...500 Ом, а опір напівпровідникових тензорезисторів від $5 \cdot 10^{-2}$...10 кОм.

Удосконалювання технології виготовлення напівпровідникових тензорезисторів створило можливість виготовляти тензорезистори безпосередньо на кристалічному елементі, виконаному із кремнію або сапфіру. Пружні елементи кристалічних матеріалів мають пружні

властивості, що наближаються до ідеального. Класи точності тензорезисторних вимірювальних перетворювачів надлишкового тиску, розрідження і різниці тисків 0,6; 1,0; 1,5. Діапазони вимірювання:

- надлишкового тиску – від 0...10 –3 до 0...60 МПа; розрідження – від –1...0 до –10...0 кПа;
- абсолютного тиску – від 0...2,5кПа до 0...2,5МПа; різниці тисків – від 0...1 кПа до 0...2,5МПа.

П'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі тиску. В основу роботи цих перетворювачів покладене перетворення вимірювального тиску в зусилля за допомогою деформаційного чутливого елемента і наступного перетворення цього зусилля в сигнал вимірювальної інформації п'єзоелектричним перетворювальним елементом.

Принцип дії п'єзоелектричного перетворювального елемента заснований на п'єзоелектричному ефекті, який спостерігається в ряді кристалів, таких, як кварц, турисін, титанат барію і ін. Суть п'єзоелектричного ефекту полягає в тому, що якщо кварцові пластини X – зрізу піддати стиску силою 9.4 Засоби вимірювання тиску насиченої пари рідин

Тиск насиченої пари (пружність пари) є одним з важливих показників якості світлих нафтопродуктів, особливо автомобільних і авіаційних бензинів. Тиск насиченої пари характеризує їх випаровуваність і схильність до утворення парових пробок, а також може використовуватися як характеристика чистоти рідких однокомпонентних речовин. Тиск насиченої пари істотно залежить від температури.

Схема механічного аналізатора пружності пари бензинів показана на рис.14.7. Аналізована рідина надходить у блок підготовки 1, з якого з постійною об'ємною витратою вона подається в змійовик 3, розміщений у термостаті 2, заповненому антифризом. Тут шляхом подачі гарячої води в змійовик 9 за допомогою регулятора 8 підтримується постійна температура, що дорівнює 38°C (при цій температурі за діючими стандартами визначається тиск насиченої пари бензинів). Зі змійовика 3 аналізована рідина, нагріта до 38°C, надходить у сопло 5 струминного насоса. При витіканні рідини із сопла за рахунок в'язкості струмись зтягує за собою пари рідини, які є в камері 4 струминного насоса, тому в названій камері створюється розрідження тим більше, чим менша пружність пари аналізованої рідини. Вимірювання розрідження в камері 4 здійснюється

вакуумметром 6 з пневматичним сигналом, що подається вторинному приладу 7.

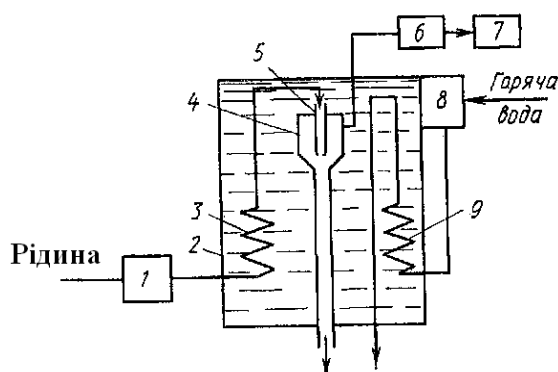


Рис. 14.7. Схема вимірювача тиску насиченої пари

Діапазон вимірювання аналізатора 250-650 мм рт. ст.; витрата аналізованої речовини $800 \text{ см}^3/\text{хв}$; абсолютна похибка вимірювання 15 мм рт. ст.

14.5. Засоби вимірювання теплоти згорання рідких і газоподібних палив

Теплота згорання є характеристикою теплової цінності палива. Під *питомою теплотою згорання* розуміють кількість теплової енергії, що виділяється при повному згоранні одиниці маси або одиниці об'єму палива. Відповідно розрізняють *питомі масову* і *об'ємну теплоти згорання*. Інформація про теплоту згорання використовується для керування процесом горіння у вогневих нагрівальних апаратах і для виконання облікових операцій, пов'язаних зі споживанням палива.

Як паливо на хіміко-технологічних процесах використовують мазут, попутний нафтовий і природний газ. Питома масова теплота згорання мазуту змінюється незначно і жорстко скоректована із густиною мазуту. Тому автоматичне вимірювання цієї величини можна звести до вимірювання густини.

Газоподібні палива можуть мати у своєму складі, крім вуглеводів негорючі компоненти, повітря, азот, діоксид вуглецю та ін., тому для визначення теплової цінності палива необхідно здійснювати вимірювання їх питомої теплоти згорання. Для газоподібних палив звичайно вимірюють питому об'ємну теплоту згорання.

Розрізняють *вищу* і *нижчу питомі теплоти згорання*. Під вищою питомою об'ємною теплотою згорання палива Q_v розуміють кількість

теплової енергії, що виділилася при згоранні одиниці об'єму палива і конденсації водяної пари, яка утримується в продуктах згорання.

Під нижчою питомою об'ємною теплотою згорання палива Q_n розуміють кількість теплової енергії, що виділилося при згоранні одиниці об'єму палива без обліку енергії, що виділяється при конденсації водяної пари із продуктів згорання. У вогневих нагрівальних апаратах для запобігання конденсації пари води в димоходах температура продуктів згорання звичайно становить $110\text{--}130^\circ\text{C}$. Тому теплова цінність палива визначається нижчою питомою теплотою згорання. Зв'язок між вищою і нижчою теплотою згорання має вигляд:

$$Q_e = Q_n + q \quad (14.9)$$

де q – теплота конденсації водяної пари, яка утворюється при згоранні одиниці об'єму палива.

Засоби вимірювання питомої теплоти згорання називають калориметрами. За принципом дії їх відносять до термохімічних аналізаторів.

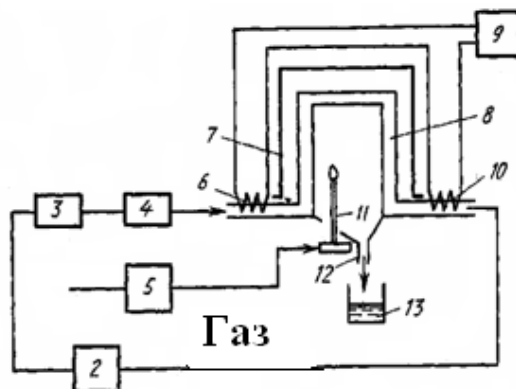


Рис. 14.8. Схема калориметру

На рис.14.8 наведена схема автоматичного калориметра, що дозволяє одержувати інформацію про вищу питому об'ємну теплоту згорання газоподібних палив. Робота калориметра побудована на вимірюванні кількості теплової енергії, що виділяється в процесі хімічної реакції горіння аналізованого газу. Останній з постійною об'ємною витратою надходить через стабілізатор витрати 5 у пальник 11. Продукти згорання обвивають стінки теплообмінника 8, розміщеного в корпусі калориметра 7, і передають всю теплову енергію, що виділяється, дистильованій воді, яка безупинно прокачується через теплообмінник. Воді також передається теплова енергія, що виділяється на стінках теплообмінника при конденсації парів води, які утворюються при згоранні вуглеводнів. Конденсат, що утворюється, збирається за допомогою конденсатівідвідника 12 і стікає в ємність 13. Для

подачі води в теплообмінник служать замкнуті системи, які складаються з резервуара 1, насоса 2, холодильника 3 і стабілізатора витрати 4. На вході і виході теплообмінника 5 розміщені батареї термоелектричних чутливих елементів 6 і 10. Ці батареї ввімкненні диференціально і за їх допомогою вимірюється різниця температур вхідного в теплообмінник і вихідного з нього потоків води. Сигнал U , що надходить на автоматичний потенціометр 9, пропорційний зазначеній різниці температур Δt , що, у свою чергу, пропорційна вищій питомій об'ємній теплоті згорання аналізованого газу:

$$U = k \cdot \frac{Q_v \cdot Q_G}{Q_v \cdot c_v} \quad (14.10)$$

де k – коефіцієнт термоелектричних чутливих елементів; Q_G і Q_v – постійні об'ємні витрати аналізованого газу і води; c_v – об'ємна теплоємність води.

За відрізок часу 1–2 год, протягом якого в ємність 13 збирається достатня для вимірювання кількість конденсату, можна визначити середнє значення нижчої об'ємної теплоти згорання, використовуючи формулу (9.16). Для цього необхідно обчислити середнє за цей інтервал часу значення вищої об'ємної теплоти згорання за показниками потенціометра 9 і виміряти кількість конденсату. Витрата аналізованого газу 0,15–0,5 м³/год; діапазон вимірювання 0–50·10³ кДж/м³; класи точності 1–2.

Запитання для самоконтролю до теми 14

1. Наведіть класифікацію приладів.
2. Рідинні засоби вимірювання тиску. Принцип дії.
3. Деформаційні прилади для вимірювання тиску. Принцип дії.
4. Установка і обслуговування деформаційних трубчасто-пружинних манометрів
5. Засоби вимірювання теплоти згорання рідких і газоподібних палив. Принцип дії.

Тема 15. Прилади для вимірювання кількості та витрати речовини

План

- 15.1. Загальні поняття
- 15.2. Прилади для вимірювання кількості речовин
- 15.3. Особливості використання приладів для вимірювання витрат маси речовин

15.1. Загальні поняття

Вимірювання витрати та маси речовин (рідких, газоподібних, сипких, твердих, пари і т. п.) широко застосовується при контролі, регулюванні та управлінні технологічними процесами.

Наприклад, у харчовій промисловості оптимальне управління багатьма технологічними процесами ґрунтується на змішуванні різних компонентів та інгредієнтів, що входять до складу виготовленого цільового продукту, в суворо визначених співвідношеннях, зміна яких може призвести до порушення ходу процесів і отримання неякісного готового продукту.

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 ($\text{м}^3/\text{с}$) та масовими ($\text{кг}/\text{с}$).

Об'ємні витрати можна визначати через середню швидкість потоку $V_{\text{сер}}$ та площу поперечного перерізу потоку. 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 ґрунтуються 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 не потрібно 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.

16) 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.

Для вимірювання витрат у процесах хімічної 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 градуовальної характеристики витратомірів розрахунковим способом (для діаметрів трубопроводів 50 мм і більше) без використання дорогих витратовимірювальних метрологічних установок. На рис. 15.1 показано ідеалізовану картину протікання речовини крізь діафрагму (а) і епюри тиску (б) та швидкості (в).

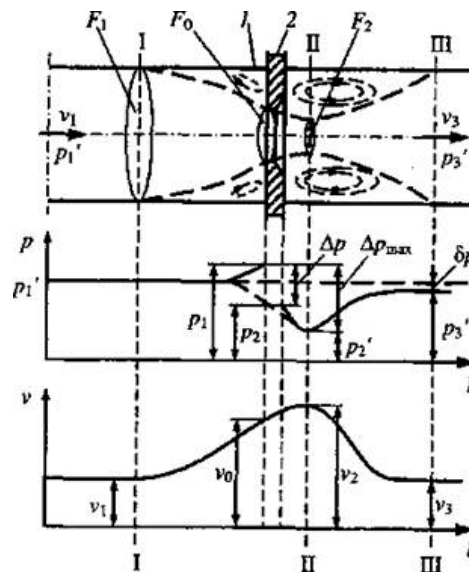


Рис. 15.1. Змінювання тиску p та швидкості потоку V під час проходження через діафрагму: 1 – трубопровід; 2 – діафрагма

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 безпосередньо перед діафрагмою дещо зростає (за рахунок зменшення швидкості в цьому місці).

Якщо швидкість в ідеальному випадку зберігається сталою то тиск за діафрагмою не досягає колишнього значення на величину тиску, 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. 15.2, 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 кола, 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

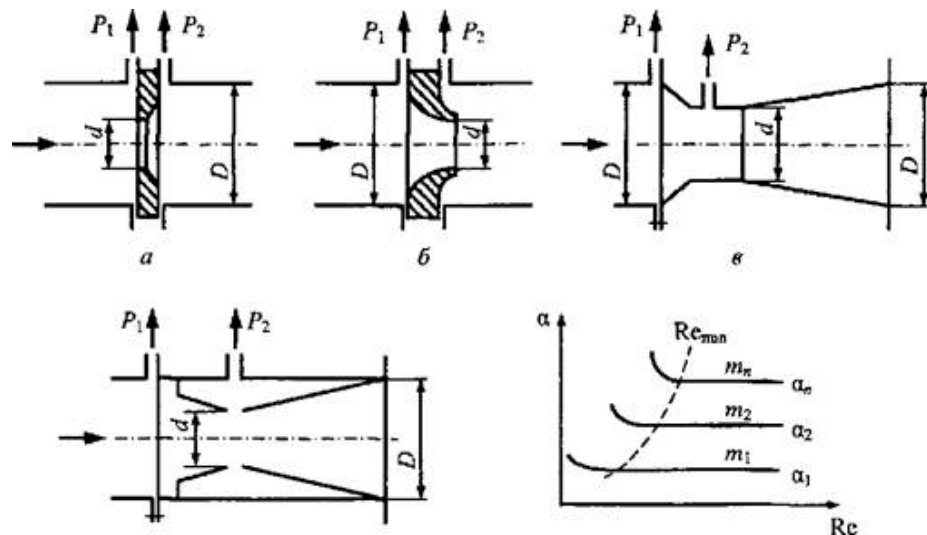


Рис. 15.2. Звужувальні пристрої: стандартна діафрагма (а); сопло ВА 1932 (б); труба Вентурі (в); труба Далла (г) та залежність коефіцієнта витрати α для діафрагм від числа Re і модуля τ (д); а, б, в, г: D – діаметр трубопроводу; d – діаметр отвору звужувального пристрою.

Характерна особливість останніх двох різновидів стандартних звужувальних пристроїв, зображених на рис. 15.2, б, в, – менші ніж для діафрагми безповоротні втрати тиску за одного й того ж значення модуля ш звужувального пристрою: якщо на діафрагмі вони досягають 50...70 % від утворюваного на звужувальному пристрої перепаду тиску, 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 %. 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 діаметрів (аж до 1000 мм). А для чисел $Re > 10$ 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 діаметрів позаяк < 125 мм у результаті вимірювання з'являється похибка від затуплення входної 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 сильно обмежують можливість вимірювання витрати в потоках з малими числами Re .

Сопла 18А 1932.В інтервалі значень діаметрів 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 входної кромки, а для газу та пари – ще й завдяки меншій похибці коефіцієнта розширення. У паропроводах високого тиску, у які звужувальні пристрої вварюються, якщо діаметр < 500 мм, завжди застосовують сопла.

Труби Вентурі. З усіх звужувальних пристроїв труби Вентурі єдині застосовуються до діаметрів 1200 мм. 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 діаметрів 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 C ($C = 0,7$ %). Але для вимірювання витрати газу та пари застосування труб Вентурі доцільне лише в разі обмежених швидкостей (менших за 10...20 м/с).

Виготовляють 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 І8А 1932.

Різновидом труби Вентурі є *труба Далла* (рис.15. 2, г), яка забезпечує більш високий перепад тиску (більше ніж у два рази) та менші втрати тиску. Вона коротша за трубу Вентурі, тому застосовується там, де для встановлення труби Вентурі бракує місця.

Найпоширеніші серед витратомірів постійного перепаду – ротаметри (рис. 15.3), 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 відносно 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.

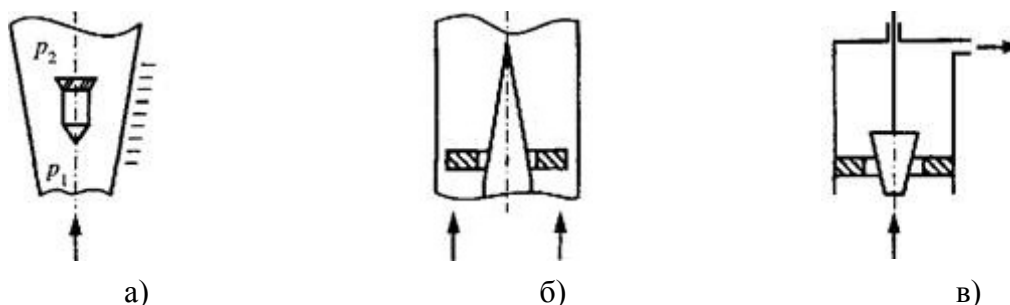


Рис.15.3. Схеми перетворювальних елементів витратомірів обтікання: ротаметрів з конічною трубкою (а) та конічною вставкою (б), поплавкових (в) витратомірів

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. 15.3 а). Зверху вниз на поплавок діє сила тяжіння поплавка в контрольованій речовині. Знизу вверх на поплавок діють три сили: 1) різниця статичних тисків перед поплавком p_2 і після нього p_1 , яка формує піднімальну силу; 2) динамічний тиск потоку; 3) сила тертя.

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 поплавков потокові, а отже, й відповідну витрату енергії на подолання цього опору, тобто перепад тиску). Зі зміною витрати контрольованої речовини відповідно змінюється піднімальна сила поплавок і рівновага сил порушується. Залежно від співвідношення сил поплавков зміщуватиметься вверх або вниз.

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.

Для вимірювання витрат у технологічних потоках у системах автоматичного керування застосовують **поплавкові витратоміри**, споряджені перетворювальними пристроями з електричним чи пневматичним вихідними сигналами (рис. 15.4).

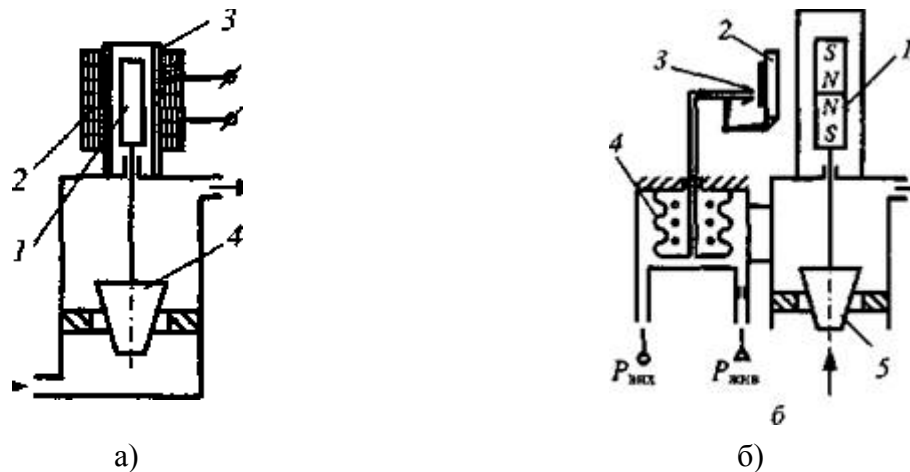


Рис. 15.4. Схема витратомірів обтікання з електричним (а) та пневматичним (б) перетворювачами сигналів: а: 1 – плунжер; 2 – котушка; 3 – трубка із немагнітного матеріалу; 4 – поплавок; б: 1 – внутрішній магніт; 2 – зовнішній магніт; 3 – сопло; 4 – сифон зворотного зв'язку; 5 – поплавок.

У першому з них (рис 15.4, а) разом з обтічним тілом (поплавков 4) переміщується плунжер 1 диференціально-трансформаторного перетворювача, котушку 2 якого надіто на трубку 3 з немагнітного матеріалу.

Переміщення поплавка пневматичного перетворювача (рис. 15.4, б) спричиняє переміщення внутрішнього магніту 1, що, у свою чергу, переміщує зовнішній магніт 2, який є заслінкою, відносно сопла 3.

Вади, що обмежують використання цих витратомірів: вони потребують переградування для кожної нової вимірюваної речовини, непридатні для вимірювання великих витрат, не існує наукових принципів їх взаємозамінності та розрахункового градування.

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.

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. 15.5, а), а для вимірювання кількості газів – із роторами лемніскатної форми (рис. 15.5, б).



Рис.15.5. – Схеми об'ємних лічильників для рідин (а) та газів (б).

Для зменшення тертя між торцевими поверхнями шестерень 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.

Серійно випускаються лічильники таких калібрів (діаметр умовного проходу вхідного патрубку – в міліметрах): 15, 20, 25, 30, 32,40, 50, 60, 80, 100, 125, 150, 200, 250 мм із границями вимірювання 0,01...250 м³/год. Для правильного вибору об'ємного рідинного лічильника необхідно знати також характеристики вимірюваної рідини (в'язкість, схильність до кристалоутворення, тиск, температуру).

Лопатеві об'ємні лічильники. 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.

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. 15.5 а); вісь обертання тангенціальних турбінок перпендикулярна до напрямку потоку, а прями лопаті розташовані радіально відносно осі (рис. 15.5, б).



Рис. 15.6 – Швидкісні лічильники з аксіальною (а) і тангенціальною (б) турбінками: 1 – струмененапрямяч; 2 – турбінка; 3 – механічний лічильний пристрій; 4 – передавальний механізм; 5 – опори.

Принцип дії *швидкісних лічильників* (рис.15.6): кількість обертів турбінки n за одиницю часу пропорційна середній швидкості потоку, який проходить через турбінку.

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 видимій (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.

Лічильники з аксіальною турбінкою виробляють для труб з діаметрами 4...750 мм і діапазоном вимірювання витрат 0,03... 1600 м³/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 м³/год).

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.

Електромагнітні 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 напрямку магнітних силових ліній, поміщено відрізок немагнітної труби і (рис. 15.7), 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 (мілівольметра чи потенціометра).

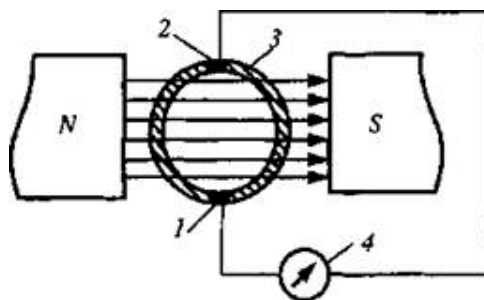


Рис.15.7. Схема електромагнітного витратоміра: 1,2 – електроди; і – відрізок труби; 4 – вимірювальний прилад.

Різниця потенціалів E на електродах 1 і 2:

$$E = B \cdot V \cdot D \quad (15.1)$$

де B – магнітна індукція; V – середня швидкість потоку рідини; D – відстань між кінцями електродів, яка дорівнює внутрішньому діаметрові трубопроводу.

Електромагнітні витратоміри мають 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.

Класи точності електромагнітних витратомірів – 0,5... 1,0. Ними можна вимірювати витрати 1...5000 м³/год у трубопроводах з діаметром 10.. 1000 мм за лінійної швидкості потоку 0,6... 10 м/с.

Ультразвукові (акустичні) витратоміри. Акустичними називають витратоміри, що ґрунтуються на вимірюванні того чи іншого ефекту, який Обертання турбінкою променя світла, що падає на фотоелемент. Частота пульсацій напруги в колі фотоелемента пропорційна частоті обертання турбінки. Зазвичай випромінювач, який працює у видимій (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.

Лічильники з аксіальною турбінкою виробляють для труб з діаметрами 4...750 мм і діапазоном вимірювання витрат 0,03... 1600 м³/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/год).

В схемі електромагнітного витратоміра: електроди; відрізок труби; вимірювальний прилад.

Електромагнітні витратоміри мають 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.

Класи точності електромагнітних витратомірів – 0,5...1,0. Ними можна вимірювати витрати 1...5000 м³/год у трубопроводах з діаметром 10...1000 мм за лінійної швидкості потоку 0,6...10 м/с.

Ультразвукові (акустичні) витратоміри. Акустичними називають витратоміри, що ґрунтуються на вимірюванні того чи іншого ефекту, який залежить від витрати і виникає у разі проходження акустичних коливань через потік рідини або газу. Майже всі застосовувані на практиці акустичні витратоміри працюють в ультразвуковому діапазоні частот і тому їх називають ультразвуковими. Розрізняють витратоміри, що ґрунтуються на переміщенні акустичних коливань рухомим середовищем, і витратоміри,

побудовані на ефекті Доплера, які з'явилися пізніше. Переважного поширення набули прилади, що ґрунтуються на вимірюванні різниці часу проходження акустичних коливань за потоком і проти нього. Значно менше приладів, у яких акустичні коливання спрямовуються перпендикулярно до потоку з наступним вимірюванням ступеня відхилення цих коливань від початкового напрямку. Прилади, побудовані на ефекті Доплера, призначені передусім для вимірювання місцевої швидкості, але ними вимірюють також витрати. Поряд із трьома зазначеними різновидами ультразвукових витратомірів є акустичні витратоміри, що одержали назву довгохвильових, оскільки вони працюють у звуковому діапазоні частот акустичних коливань.

Ультразвукові витратоміри зазвичай служать для вимірювання об'ємної витрати, позаяк ефекти, що виникають під час проходження акустичних коливань через потік рідини або газу, пов'язані зі швидкістю останнього. Але завдяки акустичному перетворювачу, що реагує на густину вимірюваної речовини, можна вимірювати масові витрати.

Конструктивно до складу ультразвукових витратомірів входять вібратор (випромінювач) і приймач ультразвукових сигналів (зазвичай це дискові п'єзоелементи, рідше – для малих діаметрів труб – використовують кільцеві). Звукові коливання високої частоти (20 кГц і вище), створені випромінювачем В1, проходять крізь контрольовану рідину, яка протікає по трубопроводу і реєструється приймачем П1, розміщеним на відстані L від випромінювача (рис.15.7).

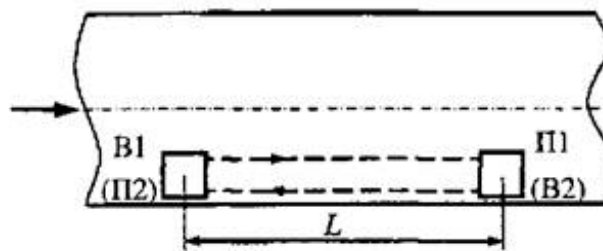


Рис. 15.7. Схема ультразвукового витратоміру

$$\Delta\tau = K \cdot Q, \quad (15.2)$$

де K – коефіцієнт, що враховує розділення швидкостей у перерізі потоку:

Q – об'ємні витрати потоку.

Інколи п'єзоелементи розміщують із зовні трубопроводу, тоді акустичні коливання до контрольованої речовини передають через спеціальні металеві звукопроводи, іноді – через рідинні. За кількістю акустичних каналів

ультразвукові витратоміри підрозділяють на одноканальні (однопроміневі), двоканальні та багатоканальні.

Одноканальні витратоміри (рис. 15.8,а) містять тільки два п'єзоелементи, кожний з яких по черзі виконує функції випромінювача та приймача. Їх істотна перевага – відсутність просторової асиметрії акустичних каналів, яка може зумовити виникнення суттєвої похибки вимірювання різниці часу проходження коротких імпульсів за потоком і проти нього.

Двоканальні витратоміри (рис. 15.8 б) мають два випромінювачі та два приймачі, що утворюють два незалежні акустичні канали, які розміщено паралельно або перехрещуються один з одним.

Багатоканальні витратоміри застосовують у разі потреби виміряти витрати деформованих потоків або ж домогтися підвищеної точності, зокрема у випадку застосування ультразвукового витратоміра як зразкового.

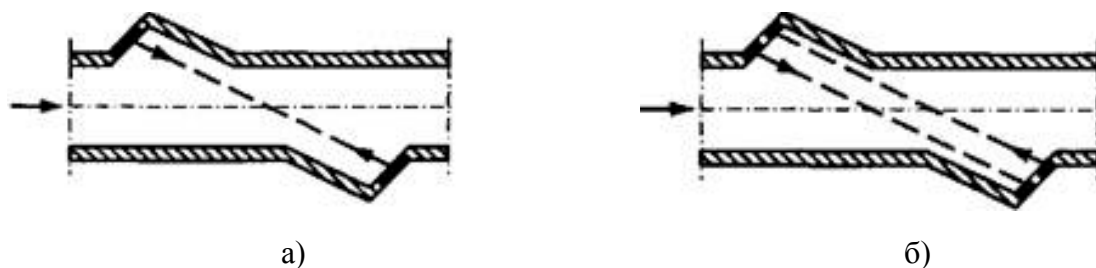


Рис. 15.8. Схеми одноканального (а) та двоканального (б) перетворювачів ультразвукових витратомірів.

Існує також **самостійний метод визначення витрати**, в основу якого покладено вимірювання зміщення контрольованим потоком рідини ультразвукової хвилі, спрямованої перпендикулярно до напрямку руху потоку.

У разі одного приймального елемента (рис. 15.9, а) кількість акустичної енергії, що надходить на нього, буде зменшуватися з підвищенням швидкості V , і вихідний сигнал підсилювача теж буде зменшуватись, оскільки в міру відхилення ультразвукового променя дедалі вужча його частина буде потрапляти на п'єзоелемент приймача.

У разі двох приймальних п'єзоелементів, розміщених симетрично відносно випромінювача (рис. 15.9, б), вихідний сигнал диференціального підсилювача зі збільшенням швидкості V буде, навпаки, зростати. Якщо швидкість $u = 0$, то вихідний сигнал дорівнюватиме нулю завдяки рівності акустичної енергії, що надходить на увімкнені зустрічно приймальні п'єзоелементи.

Труднощі практичного використання ультразвукових витратомірів зумовлені тим, що швидкість поширення звуку залежить від фізико –

хімічних властивостей середовища; ця швидкість значно більша за швидкість руху контрольованої речовини, що зумовлює потребу використання диференціальних схем для виділення «слабкого» корисного сигналу. Усе це зумовлює складність вимірювальної апаратури. Попри це, ультразвукові витратоміри дедалі більше застосовують у промисловості як завдяки надійності ультразвукової техніки взагалі, так і через можливість безконтактного вимірювання будь – яких середовищ, високу точність вимірювання у разі індивідуального градуювання приладів і використання спеціальних засобів автокомпенсації, високу швидкодію.

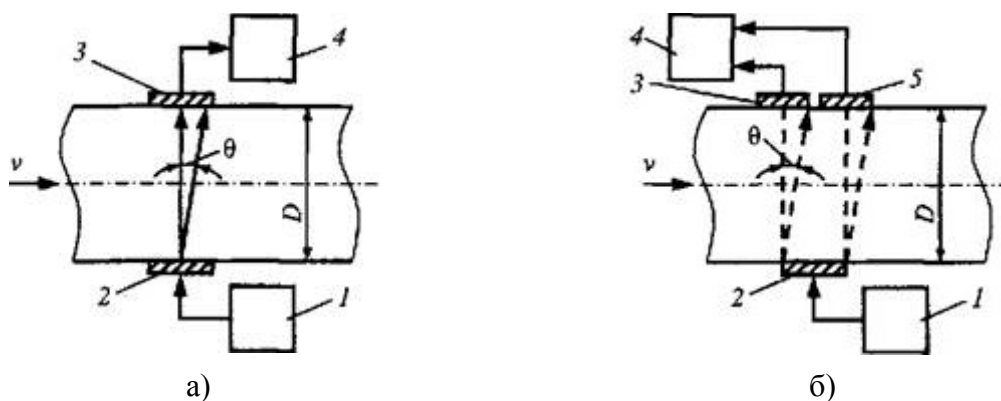


Рис.15.9. Схеми ультразвукових витратомірів з випромінюванням, перпендикулярним до осі труби: а – із заднім приймальним п'єзоелементом; б – з двома приймальними п'єзоелементами: 1– генератор; 2 – випромінювальний п'єзоелемент; 3,5 – приймальні п'єзоелементи; 4– підсилювач.

Ультразвукові витратоміри застосовують переважно для вимірювання витрат рідини. Акустичний опір газів малий, їм важко передати енергію, яка потрібна для перенесення хвилі від випромінювача до приймача, оскільки кількість енергії, що відбирається середовищем від випромінювача,

Ультразвукові витратоміри придатні для труб будь – якого діаметра, починаючи від 10 мм і більше, вони здатні забезпечити вимірювання витрат від 0,03 до 40 000 м³/год (кореляційні ультразвукові – до 150 м³/с з діаметром трубопроводу 3600...4200 мм). Зведена похибка ультразвукових витратомірів становить 0,1...2,5 %, але в середньому може бути 0,5... 1 %, Вони не містять рухомих елементів (а отже, не зношуються), не збурюють течію (немає втрати напору), незалежні від фізико – хімічних властивостей рідини (рідина може електропровідною і не електропровідною, зарядженою і т. ін.), що є їх перевагами. Недолік ультразвукових витратомірів – потребують градуювання в реальних умовах експлуатації.

Теплові витратоміри. Принцип дії теплових витратомірів (їх ще називають термальними) ґрунтується на нагріванні потоку речовини та вимірюванні різниці температур перед та після нагрівника (калориметричні витратоміри) або на вимірюванні температури нагрітого тіла, розміщеного в потоці контрольованої речовини (термоанемометричні витратоміри).

У калориметричних витратомірах застосовується переважно електричне омичне нагрівання (дуже рідко – індуктивне). При цьому нагрівник можна розміщувати як усередині трубопроводу, так і ззовні (останні називають термоконвективними, хоча нерідко використовують і загальну назву – калориметричні або квазікалориметричні).

Термоанемометричні витратоміри тепер самостійно не застосовують для технологічних вимірювань, але завдяки певним перевагам (високій чутливості, малій інерційності, можливості вимірювання мікровитрат) їх використовують як структурні складові у різних приладах (наприклад, магнітні газоаналізатори).

Калориметричні витратоміри поділяють на дві групи. Витратоміри першої групи визначають витрату за величиною потужності, споживаною нагрівником для забезпечення сталої різниці температур, а витратоміри другої групи – за різницею температур у разі незмінної потужності, підведеної до нагрівника. Різницю температур зазвичай вимірюють за допомогою ТП або ТО. Перевага ТО полягає в тому, що їх можна виконувати у вигляді рівномірної сітки, яка перебиває весь переріз потоку і, таким чином, вимірювати середню по перерізу температуру потоку (у разі внутрішнього розташування; вимірювачі температури також можуть бути змонтовані із зовні трубопроводу).

Переважно застосовують витратоміри другої групи. Принципову схему калориметричного витратоміра другої групи показано на рис. 15.10, а. Розподіл температур по обіруч від нагрівника буде залежати від витрати речовини. Коли витрата дорівнює нулю, нагрівання симетричне й температури T_1 і T_2 однакові (рис. 15.10, в). За наявності витрати ця симетрія порушується.

Первинними вимірювальними перетворювачами температури можуть бути або дві термопари, або два ТО, що утворюють двоє суміжних плечей моста Вітстона. У цьому випадку в інші двоє плечей моста увімкнено резистори з постійними опорами, а вимірюваним сигналом буде розбаланс напруги.

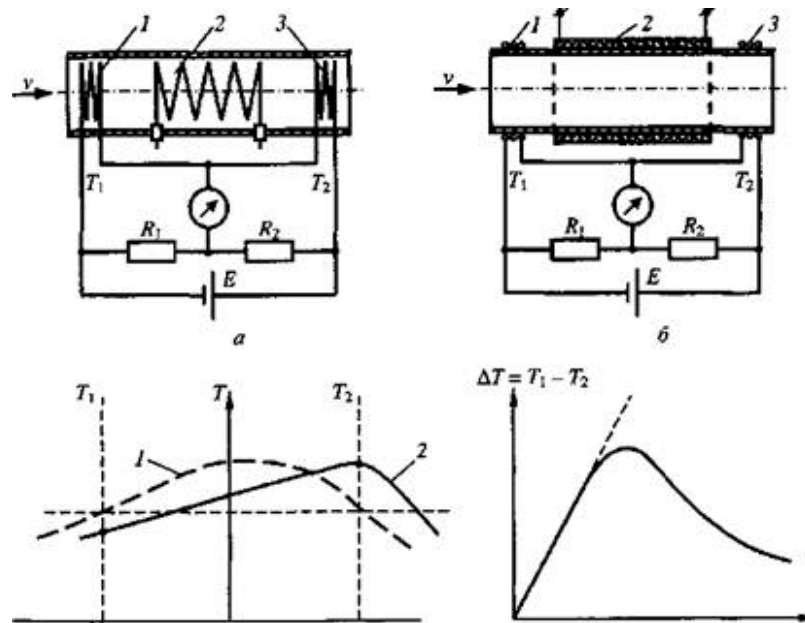


Рис. 15.10. Калориметричний (а) та термоконвективний (б) витратоміри

На трубопроводах малих діаметрів (від 1,5 до 25 мм) застосовують термоконвективні витратоміри (рис. 15.10, б). Такий витратомір являє собою тонкостінну металеву трубку малого діаметра, на зовнішню поверхню якої намотано дротяний нагрівник 2, а пообіруч від нього розміщено два вимірювачі температури – ТП або ТО (останні також намотуються на трубопровід).

Калориметричними та термоконвективними витратомірами вимірюють масову витрату за умови сталості теплоємності вимірюваної речовини, що є їх перевагою. Ще одна перевага термоконвективних витратомірів – вони не контактують із вимірюваною речовиною. Недолік як одних, так і других – велика інерційність, для зменшення якої використовують коригувальні схеми, а також імпульсне нагрівання.

Калориметричні витратоміри забезпечують високу точність (похибка $\pm 0,3 \dots 1\%$, для термоконвективних – $1,5 \dots 3\%$), великий діапазон вимірювання (10:1), вимірювання пульсуючих і малих витрат.

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. 15.11) з гострими ребрами, яка встановлюється у трубопроводі 2 перпендикулярно до напрямку потоку і на гострих ребрах якої утворюються вихори 3.

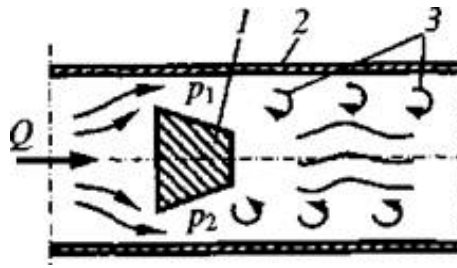


Рис.15.11. Принцип роботи вихрового витратоміра: 1 – призма з гострими ребрами; 2 – трубопровід; 3 –вихори

Вихори 3, що проходять у зоні призми 1, утворюють поле змінного пульсуючого тиску, пропорційного частоті, що дозволяє вимірювати їх частоту. Переріз призми може бути різноманітної форми. При цьому картина вихорів за призмою залежить від виду перерізу призми. Однак для всіх видів призми характерне утворення пульсуючих тисків p_1 і p_2 (рис. 15.11), частоту яких можна досить легко перетворити в електричні вихідні частотні сигнали за допомогою різних перетворювачів (терморезистивних, п'єзоелектричних, індукційних тощо).

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 $\pm 0,5 \dots 1,5 \%$); стабільність показань; можливість отримання універсального градування (більшість конструкцій поки що потребують індивідуального градування). 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).

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 м³/год, рідин – 1.. .25 000 м³/год.

Коріолісовими називають витратоміри, в яких під впливом силової дії виникає коріолісове прискорення, що залежить від масової витрати. Коріолісові витратоміри поряд з гіроскопічними та турбосиловими належать

до силових витратомірів. Принцип дії цих витратомірів ґрунтується на використанні другого закону Ньютона:

$$P = -ma, \quad (15.3)$$

де P – сила; m – маса; a – прискорення (тут – прискорення Коріолісе).

Вимірювальна трубка (U – подібної форми коливається з миттєвою кутовою швидкістю відносно осі, перпендикулярної до рукавів трубки (рис. 15.12, а). Ці коливання, подібні коливанням камертона, спричиняються задавальною електромагнітною котушкою, розміщеною в центрі вигину вимірювальної трубки. Амплітуда коливань становить менше 1 мм, а частота – близько 80 Гц.

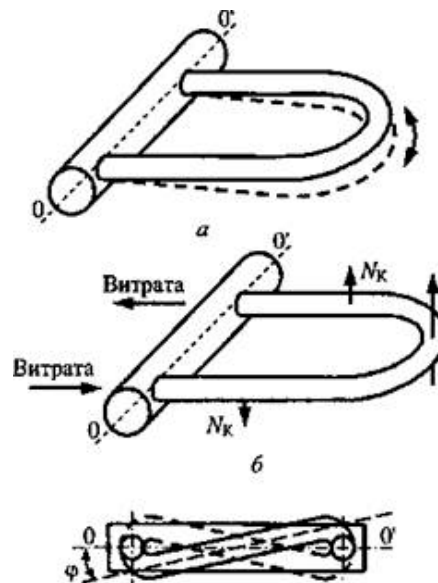


Рис. 15.12. Схеми динамічних процесів у коріолісовому витратомірі: а – коливна трубка; б – напрями дії коріолісових сил; в – крутильні коливання вимірювальної трубки.

Під час проходження через U-подібну трубку зі швидкістю V рідина, масова витрата якої, набуває вертикальної складової руху цієї вібральної трубки, отриману цією трубкою від задавальної котушки. Коли трубка під час першої половини циклу коливання рухається вгору, рідина, що затікає в неї, чинить опір цьому рухові вгору і давить на трубку вниз із коріолісовою силою. Поглинувши вертикальний імпульс цієї сили під час руху навколо вигину трубки, рідина, витікаючи з трубки, опирається зменшенню вертикальної складової руху і штовхає трубку вгору із тією ж силою (рис. 15.12, б).

Таким чином, у вхідній половині U-подібної трубки сила, що діє з боку рідини, перешкоджає зсуву трубки, а у вихідній – сприяє. Це призводить до вигину U-подібної трубки – ефект Коріолісе (рис. 15.12, в). Коли в другій

фазі вібраційного циклу трубка рухається вниз, напрям вигину змінюється на протилежний. У результаті трубка здійснює крутильні коливання (коли потоку вимірюваної рідини у трубці немає, вона не вигинається).

Коріолісова сила, а отже, й кут закручування ϕ сенсорної трубки прямо пропорційні кількості рідини, що проходить через трубку за одиницю часу, тобто масовій витраті рідини. Кут закручування можна виміряти сенсорами положення, сигнали яких після перетворення дозволяють отримати напругу, пропорційну масовій витраті.

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) невинно 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 то ця абсциса відповідатиме часові переміщення потоку на цю відстань.

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).

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 (рис. 15.13 а).

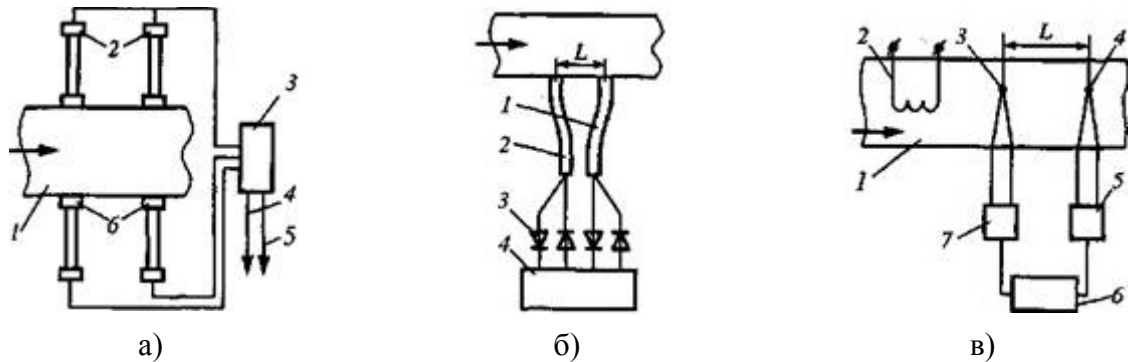


Рис.15.13. Схеми акустичного (а), оптичного (б) і теплового (в) кореляційних витратомірів: а: 1 – трубопровід; 2,6 – випромінювач і приймач первинного перетворювача; 3 – електронний перетворювач; 4 – струмовий вихід; 5 – імпульсний вихід; б: 1,2 – світловоди; 3 – світлодіоди; 4 – вимірювальний блок; в: 1 – трубопровід; 2 – нагрівник; 3,4 – термопари; 5,7 – підсилювачі; 6 – корелометр

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. Схему теплового кореляційного витратоміра показано на рис. 15.13, в. У трубі 1 розміщено нагрівник 2, струм у якому змінюється випадково, наприклад у разі змінювання напруги живлення або частого вимикання через різні проміжки часу генератора псевдовипадкових сигналів. Далі за напрямом потоку встановлено дві термопари 3 і 4 на відстані L одна від одної. Через підсилювачі 5 і 7 вони сполучені з корелометром 6.

15.2. Прилади для вимірювання кількості речовин

Кількість речовини виражають у одиницях об'єму (м^3) чи маси (кг), а кількість теплоти – у одиницях енергії (Дж, ГДж).

Прилади для вимірювання кількості називають лічильниками. Лічильники вимірюють об'єм величини або величину енергії за будь – який

проміжок часу: доба, тиждень, місяць і т.п.. Кількість при цьому визначається як різниця показань лічильника.

Лічильники речовин, найчастіше, є приладами прямого вимірювання і відлік по їх шкалі дає значення кількості без додаткових обчислень, а *теплोलічильники* – це прилади посередніх вимірювань, де результат визначається обчисленням по значенням прямих вимірювань температур прямого і зворотного потоків та витрати потоку теплоносія. *Витрата речовини* також може бути об'ємною ($\text{м}^3/\text{с}$) або масовою ($\text{кг}/\text{с}$) і визначається кількістю речовини, що проходить крізь той чи інший переріз каналу за одиницю часу.

Прилади для вимірювання витрати називають витратомірами. Ці прилади додатково можуть бути оснащені лічильниками (інтеграторами), що дозволяє проводити вимірювання витрати і кількості. У залежності від метода вимірювання можна виділити наступні витратоміри:

1) *змінного перепаду тисків*, що оснований на залежності від витрати перепаду тисків у звужувальному пристрої в наслідок часткового переходу потенційної енергії потоку у кінетичну;

2) *витратоміри критичного стікання* із звужувальним пристроєм, витрата потоку крізь яке не залежить від тиску за звужувальним пристроєм і визначається лише тиском потоку перед ним; швидкісного напору для вимірювання витрати динамічного напору потоку за допомогою пневмометричних трубок;

3) *змінного рівня*, що оснований на залежності від витрати висоти рівня рідини у посудині при вільному стіканні її крізь отвір у дні чи боковій стінці посудини;

4) *постійного перепаду тисків*, що оснований на залежності від витрати речовини вертикального переміщення тіла (поплавка), який змінює при цьому площину перерізу прохідного отвору приладу таким чином, щоб перепад тисків по обидва боки поплавка залишався постійним; безконтактні, серед яких переважно застосовуються електромагнітні, ультразвукові і теплові.

15.3. Особливості використання приладів для вимірювання витрат маси речовин

В даний час потреби промисловості в приладах для вимірювання витрат, маси і об'єму різних продуктів задовольняються в основному

загальнопромислові приладами і пристроями. Розглянемо використання приладів на прикладі харчової промисловості.

Саме в харчовій промисловості є велика номенклатура приладів і пристроїв, призначених для вимірювання витрат харчових продуктів, в конструкціях яких враховуються специфічні властивості останніх. Зокрема, широке застосування знаходять автоматичні зважують і дозуючі пристрої для цукру – піску, круп, какао – порошку, кави та інших сипучих матеріалів. Випускаються спеціальні прилади для вимірювання витрат, маси і об'єму рідких харчових продуктів: молока, олії, виноматеріалів і т.п.

За принципом дії спеціальні прилади аналогічні загальнопромислові, але їх конструкція враховує деякі специфічні вимоги: можливість швидкого чищення та миття (бажано безрозбірного); відсутність застійних зон і т. п. Крім того, при виготовленні таких приладів повинні використовуватися матеріали, які не піддаються корозійного або хімічної дії з сторони продукту. Як матеріали часто використовуються нержавіючі сталі, спеціальні сорти скла, пластмаси, а також футеровочні матеріали (емалі, фторопласт і т. п.), якими покриваються поверхні приладів, знаходяться в безпосередньому контакті із середовищем.

Прилади для вимірювання витрат, маси або об'єму харчових продуктів повинні володіти високою точністю і надійністю вимірювання, тому що більшість вимірювань є обліково-звітними і на підставі їх виробляються приймає і здає вихідної сировини або готового продукту.

Останнім часом широкого поширення набувають методи і прилади, в яких відсутні рухомі елементи або дроселюючий пристрій. Так, за допомогою індукційних витратомірів можна проводити вимір сипучих; речовин що швидко кристалізуються і сильно забруднених рідин, розчинів і пульп, а також патоки, рідких дріжджів, цукрової маси та ін..

Для вимірювання витрати дуже в'язких продуктів типу опари, тіста, цукеркової маси, фруктових начинки та ін.. дуже перспективно застосування теплових і акустичних витратомірів. Однак ці витратоміри стосовно до харчової промисловості серійно не випускаються.

При використанні загальнопромислових витратомірів і ротаметрів слід передбачати необхідність частого їх розбирання для очищення чутливих елементів і поплавців від осідають на них твердих речовин.

Прилади й пристрої для автоматичного рахунки штучних виробів, не дивлячись на простоту і доступність, не отримали ще досить широкого

поширення із-за відсутності лічильників, що відрізняються високою надійністю, швидкодією, вибірковістю і т. п.

Зважаючи на важливість вимірювання витрат харчових продуктів потрібно розробка нових уніфікованих приладів, що відрізняються підвищеною точністю і надійністю. Перспективними в цьому відношенні є прилади, засновані на безконтактних методах, – вихрові, електромагнітні, акустичні та інші, а для вимірювання витрат дуже в'язких продуктів – теплові.

Нормальна експлуатація всіх типів приладів можлива лише за дотримання правил експлуатації, основними з яких є: відсутність значних пульсацій тиску в трубопроводах, сильних вібрацій і ударів; підтримка температури і тиску вимірюваної середовища в допустимих межах; плавне включення потоків при пуску приладів щоб уникнути динамічних ударів потоку; відповідність щільності й в'язкості вимірюваного середовища градуюванню.

Витратоміри змінного перепаду тиску є одними з найбільш розповсюджених приладів, що застосовуються у різних галузях промисловості. Цим витратомірам притаманні переваги, що забезпечили їм не тільки широке застосування, але і тривалу живучість незважаючи на існування великої кількості інших приладів вимірювання витрати і кількості матеріальних потоків. До цих переваг можна на сам перед віднести наступні: простота конструкції і експлуатації; універсальність застосування, для потоків рідини, газу і пари; можливість повірки і атестації звужувальних пристроїв шляхом розрахунку по результатах вимірювань геометричних розмірів трубопроводу і звужувального пристрою; зручність масового виробництва, що передбачає індивідуальне виготовлення тільки звужувальних пристроїв, а дифманометри і вторинні прилади є серійними пристроями, випуск яких промисловістю не залежить ні від виду, ні від параметрів вимірювального середовища.

Витратоміри критичного стікання застосовують в основному для вимірювання витрати газових потоків. До витратомірів критичного стікання належать витратоміри із звужувальним пристроєм (соплом). Витрата газу через яке не залежить від тиску газу за соплом і визначається тільки тиском газу перед ним. Це пов'язано з тим, що при досягненні або перевищенні газом у звужувальному пристрої швидкості звуку тиск газу за соплом не буде впливати на швидкість потоку газу у критичному перерізі сопла.

Витратоміри постійного перепаду тисків є витратоміри з поплавком, який вільно переміщується у корпусі приладу. Ці прилади називають ротаметрами, які широко застосовуються для вимірювання невеликих витрат рідини і газу. Перевага ротаметрів: незначні втрати тиску, та їх незалежність від витрати і високий діапазон вимірювання ($Q_{\max}/Q_{\min} = 10:1$).

Недоліками ротаметрів є висока чутливість до температурної зміни в'язкості, неможливість вимірювання витрати забруднених рідин та рідин, з яких випадає осадок, можливість установа тільки на вертикальній ділянці трубопроводу.

Основними елементами ротаметру є конусна трубка, що розширюється знизу догори, і поплавок, розташований у середині трубки. Потік речовини, що проходить крізь ротаметр знизу, піднімає поплавок до тих пір, доки кільцева щілина поміж тілом поплавка і стінками конусної трубки не досягне такої величини, за якої діючі на поплавок сили врівноважуються. За умов рівноваги сил поплавка встановлюється на такій висоті, що однозначно буде характеризувати витрату. Залежність положення поплавка від витрати, що вимірюється, лінійна, тобто шкала ротаметрів рівномірна.

Ультразвукові витратоміри знайшли широке розповсюдження у промисловості завдяки таким перевагам як швидкодія, перешкодостійкість, висока точність, великий діапазон вимірювання, багатофункціональність, можливість застосування для будь – якої форми поперечного перерізу трубопроводу. Ультразвуковий метод вимірювання ґрунтується на явищі зміщення звукового коливання рідкого середовища, що рухається. При цьому використовують найчастіше три способи. Перший спосіб побудований на вимірюванні різниці фазових зсувів двох ультразвукових коливань, направлених за потоком і проти нього. Ці прилади називають фазовими витратомірами. Інший спосіб побудований на вимірюванні різниці частот повторення коротких імпульсів чи пакетів ультразвукових коливань, направлених одночасно за потоком і проти нього. Ці прилади називають частотними витратомірами. Перевага останніх полягає у незалежності показань від швидкості розповсюдження у середовищі, тобто виключається вплив фізичних параметрів середовища (густина, температура) на результати вимірювання.

І нарешті останній спосіб ґрунтується на акустичній локації рівня рідини у тому чи іншому відкритому каналі та в подальшому перерахуванні

його у миттєве значення рівня і витрати. Ці прилади називають комбінованими витратомірами і можуть використовуватися лише для потоків рідини з атмосферним тиском. *Електромагнітні витратоміри*. Принцип дії витратомірів побудований на явищі електромагнітної індукції, у відповідності з яким при протіканні електропровідного середовища (вода – середовище з іонною провідністю – провідник другого роду) у магнітному полі, у ньому індукується електрорушійна сила (ЕРС) E , що пропорційна середній швидкості середовища V і індукції B магнітного поля:

$$E = \kappa B V l, \quad (15.4)$$

де l – відстань між електродами; κ – безрозмірний коефіцієнт, що визначається геометричними і конструктивними параметрами первинного перетворювача (датчика).

Застосовують електромагнітні витратоміри загалом лише для рідини з електричною провідністю не менше $10^{-3} \div 10^{-5}$ См/м і не більше 10 См/м. Електромагнітні витратоміри мають цілу низку переваг. Насамперед вони практично безінерційні, що дуже важливо для вимірювання швидко протікаючих витрат при використанні їх у складі систем автоматичного регулювання.

На результат вимірювань не впливає наявність завислих частин у рідині і пазирів газу. Показання витратоміру не залежать від властивостей контрольованої рідини (в'язкість, густина) і характеру потоку (ламінальний, турбулентний). При відповідному підборі матеріалу із застосуванням антикорозійного і іншого покриття електромагнітні витратоміри можна застосовувати для вимірювання витрати агресивних рідин, а також рідин і паст з абразивними властивостями. Внаслідок лінійної залежності наведеної ЕДС від витрати шкала приладу лінійна. Цим витратомірам притаманний достатньо широкий діапазон вимірювання витрати. Перетворювачі електромагнітних витратомірів не мають елементів, що рухаються, та звужень.

До недоліків електромагнітних витратомірів слід віднести необхідність компенсації перешкод, які виникають при змінному полі у колі електродів, також обставину неможливості вимірювання витрат газів і таких рідин, як мастила, бензин та інші нафтопродукти, внаслідок малої електропровідності. Неприпустимо застосовувати електромагнітні витратоміри поблизу електросилових пристроїв, які утворюють сильні електромагнітні поля, а також для потоків рідини з завислими феромагнітними частинками.

Випускаються витратоміри з електромагнітним перетворювачем витрати і з електромагнітним перетворювачем швидкості потоку. Процеси, що протікають в них мають однакову фізичну основу.

Калориметричні витратоміри побудовані на нагріві потоку рідини чи газу стороннім джерелом енергії, утворюючим у потоці різницю температур, яка залежить від швидкості потоку і витрати теплоти у нагрівачі. Калориметричні витратоміри мають високу точність і великий діапазон вимірювання. Застосовуються переважно для вимірювання витрати газу.

Вихрові витратоміри ґрунтуються на ефекті Кармана. Цей ефект полягає в тому, що коли в потоці середовища поставити призму з гострими ребрами, наприклад трикутникову, у перерізі, перпендикулярному до потоку, то на цих ребрах відбувається зрив потоку з утворенням вихрів, частота яких буде пропорційна швидкості потоку.

Запитання для самоконтролю до теми 15

1. Витратоміри змінного перепаду тиску. Будова, принцип роботи.
2. Витратоміри постійного перепаду тиску. Будова, принцип роботи.
3. Тахометричні витратоміри. Будова, принцип роботи.
4. Електричні витратоміри. Будова, принцип роботи.
5. Вихрові витратоміри. Будова, принцип роботи.
6. Коріолісові витратоміри. Будова, принцип роботи.
7. Кореляційні витратоміри. Будова, принцип роботи.

Тема 16. Вимірювання рівня рідин

План

- 16.1 Загальні відомості
- 16.2 Візуальні засоби вимірювання рівня
- 16.3 Поплавкові засоби вимірювання рівня
- 16.4 Буйкові засоби вимірювання рівня
- 16.5 Гідростатичні засоби вимірювання рівня
- 16.6 Електричні засоби вимірювання рівня
- 16.7 Акустичні засоби вимірювання рівня
- 16.8 Радіоізотопні рівнеміри

16.1 Загальні відомості

Рівнем називають висоту заповнення технологічного апарата робочим середовищем – рідиною або сипучим тілом. Рівень робочого середовища є технологічним параметром, інформація про нього необхідна для контролю режиму роботи технологічного апарата, а в ряді випадків для керування виробничим процесом і для проведення заходів щодо енергоаудиту.

Шляхом вимірювання рівня можна одержувати інформацію про масу рідини в резервуарах. Подібна інформація широко використовується для керування виробничим процесом. Рівень вимірюють в одиницях довжини. Засоби вимірювання рівня називають **рівнемірами**.

Розрізняють рівнеміри, які призначені для *вимірювання рівня робочого середовища; вимірювання маси рідини в технологічному апараті; сигналізації граничних значень рівня робочого середовища – сигналізатори рівня*.

За діапазоном вимірювання розрізняють **рівнеміри широкого** (з межами вимірювання 0,5–20 м) і **вузького діапазонів** (межі вимірювання (0...±100) мм або (0...±450) мм). На даний час вимірювання рівня в багатьох галузях промисловості здійснюють різними за принципом дії рівнемірами, з яких дістали поширення *візуальні, поплашкові, буйкові, гідростатичні, електричні, ультразвукові і радіоізотопні*.

16.2 Візуальні засоби вимірювання рівня

До візуальних засобів вимірювання рівня відносять *мірні лінійки, рейки, рулетки з лотами (циліндричними стрижнями) і скляні рівнеміри*.

У виробничій практиці широкого застосування набули скляні рівнеміри. Вимірювання рівня за допомогою скляних рівнемірів (рис.16.1, а) ґрунтується на законі сполучених посудин. Вказівне скло 1 за допомогою арматур з'єднують із нижньою і верхньою частинами ємності. Спостерігаючи за положенням меніска рідини в трубці 1, роблять висновок про положення рівня рідини в ємності. Для виключення додаткової похибки, обумовленої розходженням температури рідини в резервуарі і у скляній трубці, перед вимірюванням здійснюють промивання скляних рівнемірів.

Для цього передбачений вентиль 2. Арматура скляних рівнемірів оснащується запобіжними клапанами, що забезпечує автоматичне перекривання каналів, які зв'язують вказівне скло з технологічним апаратом при випадковій поломці скла. Через низьку механічну міцність скляні рівнеміри звичайно виконують довжиною не більше 0,5 м.

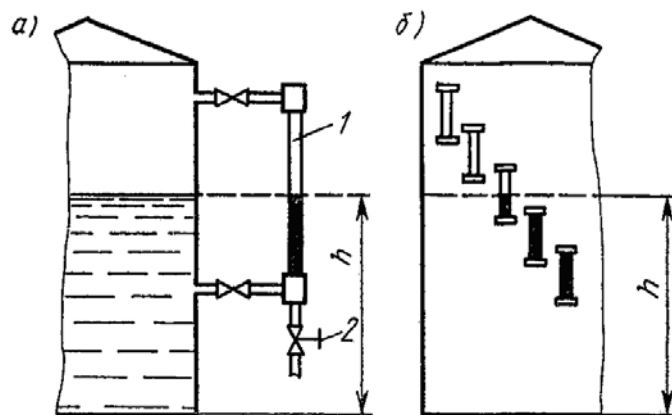


Рис. 16.1. Схеми візуальних рівнемірів

Тому для вимірювання рівня в резервуарах (рис.16.1 б) встановлюється декілька скляних рівнемірів з тим розрахунком, щоб вони перекривали один одного. Абсолютна похибка вимірювання рівня скляними рівнемірами $\pm(1 - 2)$ мм. При вимірюванні можливі додаткові похибки, пов'язані із впливом температури навколишнього середовища. Скляні рівнеміри застосовуються до тисків 2,94 МПа і до температури 300°C.

16.3 Поплавкові засоби вимірювання рівня

Серед існуючих різновидів рівнемірів поплавкові є найбільш простими. Дістали поширення поплавкові рівнеміри вузького і широкого діапазонів. Поплавкові рівнеміри вузького діапазону (рис.16.2) звичайно являють собою пристрій, який містить кульковий поплавок діаметром 80 – 200 мм, виконаний з нержавіючої сталі. Поплавок плаває на поверхні рідини і через

штангу і спеціальне ущільнення з'єднується або зі стрілкою вимірювального приладу, або з перетворювачем 1 кутових переміщень в уніфікований електричний або пневматичний сигнал.

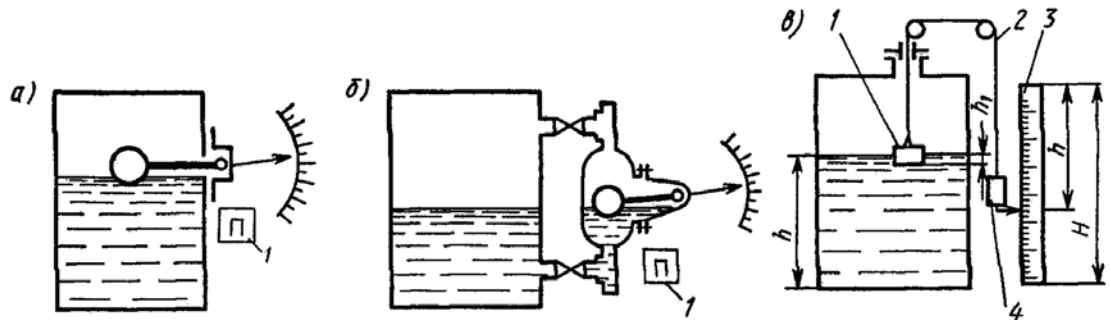


Рисунок 16.2. Схеми поплавкових рівнемірів. Поплавкові рівнеміри вузького діапазону

Рівнеміри вузького діапазону випускаються двох типів: *фланцеві* (рис.16.2,*а*) і *камерні* (рис.16.2,*б*), що відрізняються способом їх установлення на технологічних апаратах. Мінімальний діапазон вимірювання цих рівнемірів 0 – 10 мм, максимальний – 0...200 мм. Клас точності 1,5. Поплавкові рівнеміри широкого діапазону (рис.16.2?*в*) являють собою поплавки 1, пов'язаний із противагою 4 гнучким тросом 2. У нижній частині противаги закріплена стрілка, що показує за шкалою 3 значення рівня рідини в ємності.

При розрахунках поплавкових рівнемірів підбирають такі конструктивні параметри поплавка, які забезпечують стан рівноваги системи «поплавки – противага» тільки за певної глибини занурення поплавка. Якщо знехтувати силою ваги троса і тертям у роликах, стан рівноваги системи «поплавки – противага» описується рівнянням:

$$G_B = G_{II} - S \cdot h_1 \cdot \rho_{ж} \cdot g \quad (16.1)$$

де G_B , G_{II} – сили ваги противаги і поплавка, Н; S – площа поплавка, м²; h_1 – глибина занурення поплавка, м; $\rho_{ж}$ – густина рідини, кг/м³.

Підвищення рівня рідини змінює глибину занурення поплавка і на нього діє додаткова сила виштовхування. У результаті рівняння (16.1) порушується, і противага опускається вниз до того часу, доти глибина занурення поплавка не стане дорівнювати h_1 ,

При зниженні рівня діюча на поплавки сила виштовхування зменшується, і поплавки починає опускатися вниз до того часу, доти глибина занурення поплавка не стане дорівнювати h_1 . Для передачі інформації про значення рівня рідини в резервуарі застосовують селісині системи передачі.

16.4. Буйкові засоби вимірювання рівня

В основу роботи буйкових рівнемірів покладене фізичне явище, яке описується законом Архімеда. Чутливим елементом у цих рівнемірах є циліндричний буй, виготовлений з матеріалу із густиною, більшою за густину рідини. Буй перебуває у вертикальному положенні і частково занурений у рідину. При зміні рівня рідини в апараті маса буя в рідині змінюється пропорційно зміні рівня. Перетворення ваги буя в сигнал вимірювальної інформації здійснюється за допомогою уніфікованих перетворювачів «сила-тиск» і «сила-струм». Відповідно до виду використовуваного перетворювача сили розрізняють *пневматичні* та *електричні буйкові рівнеміри*.

Схема буйкового пневматичного рівнеміра наведена на рис.16.3. Рівнемір працює в такий спосіб. Коли рівень рідини в апараті дорівнює початковому h_0 (в окремому випадку h_0 може дорівнювати 0), вимірювальний важіль 2 перебуває в рівновазі, тому що момент M_1 , створюваний вагою буя G , врівноважується моментом M_2 , створюваним противагою N . Коли рівень рідини стає більшим h_0 , частина буя занурюється в рідину, при цьому вага буя зменшується, а отже, зменшується і момент M_1 , створюваний буєм на важелі 2. Внаслідок того, що M_2 стає більшим M_1 , важіль 2 повертається навколо точки O за годинниковою стрілкою і прикриває заслінкою 7 сопло 8. Тому тиск у лінії сопла збільшується.

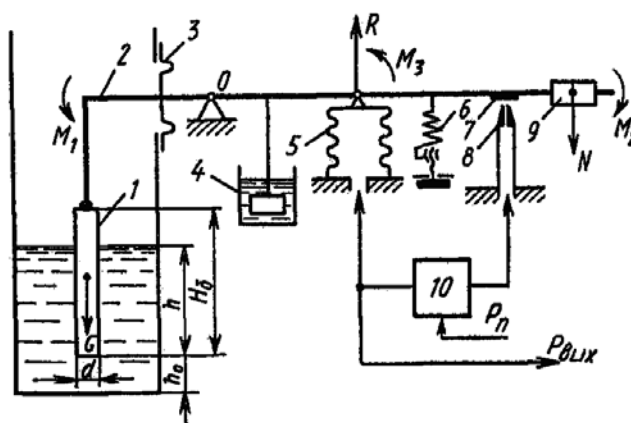


Рис. 16.3. Схема буйкового пневматичного рівнеміра

Цей тиск надходить у пневматичний підсилювач 10, вихідний сигнал якого є вихідним сигналом рівнеміра. Цей самий сигнал одночасно посилюється в сильфон негативного зворотного зв'язку 5. Під дією тиску $P_{вих}$ виникає сила R , момент M_3 якої збігається за напрямком з моментом M_1 , тобто дія сили R спрямована на відновлення рівноваги важеля 2. Рух

вимірювальної системи перетворювача відбувається до того часу, доти сума моментів всіх сил, що діють на важіль 2, не стане дорівнювати 0.

Крім розглянутої модифікації пневматичних рівнемірів, випускаються рівнеміри, оснащені уніфікованим перетворювачем «сила–тиск». Верхні межі вимірювання рівнеміра з уніфікованим електричним сигналом обмежені значеннями 0,02 – 16 м.

Буйкові засоби вимірювання рівня застосовуються при температурі робочого середовища від – 40 до +400°C і тиску робочого середовища до 16 МПа. Класи точності буйкових рівнемірів 1,0 і 1,5.

16.5 Гідростатичні засоби вимірювання рівня

Вимірювання рівня гідростатичними рівнемірами зводиться до вимірювання гідростатичного тиску P , Па, створеного стовпом h рідини постійної густини ρ , відповідно до рівності:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (16.2)$$

Вимірювання гідростатичного тиску здійснюється:

- манометром, який підключають на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня;
- диференціальним манометром, який підключають до резервуара на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня, і до газового простору над рідиною;
- вимірюванням тиску газу (повітря), який прокачується по трубці, опущеної в рідину, що заповнює резервуар, на фіксовану глибину.

На рис.16.4,*а* наведена схема вимірювання рівня манометром. Застосовуваний для цих цілей манометр 1 може бути будь – якого типу з відповідними межами вимірювання, обумовленими залежністю (16.2).

Вимірювання гідростатичного тиску манометром може бути здійснено і за схемою, наведеною на рис.16.4 *б*. Відповідно до даної схеми про значення вимірюваного рівня роблять висновок про тиск повітря, що заповнює манометричну систему.

У нижній частині манометричної системи розміщена ємність 2, отвір якої перекрито тонкою еластичною мембраною 1, а у верхньому отворі приєднаний манометр 3. Застосування еластичної мембрани виключає розчинення повітря в рідині, однак вводить похибку у визначення рівня через пружність мембрани. Перевагою даної схеми вимірювання гідростатичного

тиску є незалежність показань манометра від його розміщення щодо рівня рідини в резервуарі.

При вимірюванні рівня за розглянутими схемами мають місце похибки вимірювання, обумовлені класом точності манометрів і змінами щільності рідини.

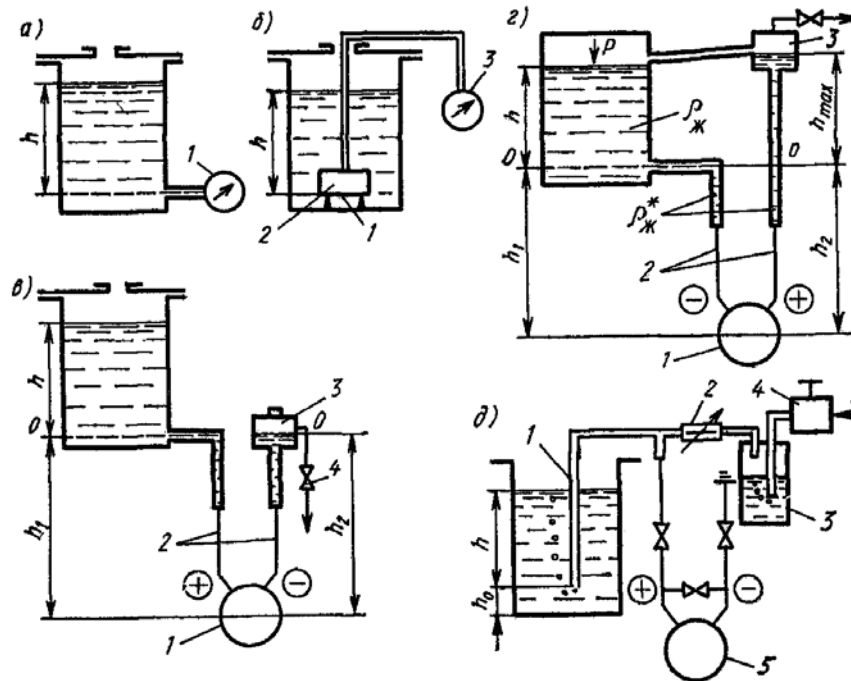


Рис. 16.4. Схеми гідростатичних рівнемірів

Вимірювання гідростатичного тиску манометрами доцільно в резервуарах, що працюють при атмосферному тиску. У протилежному разі показання манометра складаються з гідростатичного і надлишкового тисків.

Для вимірювання рівня рідини в технологічних апаратах, які перебувають під тиском, широкого застосування набули диференціальні манометри. За допомогою диференціальних манометрів можливе також вимірювання рівня рідини у відкритих резервуарах, рівня поділу фаз і рівня розділення рідин.

Вимірювання рівня у відкритих резервуарах, які перебувають під атмосферним тиском, здійснюється за схемою, поданою на рис.7.4 в. Дифманометр 1 через і зрівняльною посудиною 3. Зрівняльна посудина застосовується для компенсації статичного тиску, створюваного стовпом рідини h_1 в імпульсній трубці. У процесі вимірювання рівень рідини в зрівняльній посудині повинен бути постійним. Вентиль 4 служить для підтримки постійного рівня в посудині 3. При рівності густини рідин, що заповнюють імпульсні трубки і резервуар, і за умови $h_1 = h_2$ перепад тиску, Па, вимірюваний дифманометром:

$$\Delta P = \rho_p \cdot g \cdot h. \quad (16.3)$$

При вимірюванні рівня в апаратах, які перебувають під тиском, застосовують схему, наведену на рис.16.4,з. Зрівняльну посудину 3 у цьому випадку встановлюють на висоту, що відповідає максимальному значенню рівня, і з'єднують із апаратом. Статичний тиск P в апараті надходить в обидві імпульсні трубки, тому вимірюваний перепад тиску ΔP , Па, можна визначити за формулою:

$$\Delta eP = - \rho_{ж} \cdot g \cdot h. \quad (16.4)$$

Як бачимо з рівняння (16.4), шкала вимірювального приладу рівнеміра буде оборотною. У розглянутих схемах можуть бути використані дифманометри з уніфікованим струмовим або пневматичним сигналом.

Якщо рідина, що заповнює резервуар, агресивна, то підключення дифманометра до резервуара здійснюється через розділювальні посудини.

Рівнеміри, у яких вимірювання гідростатичного тиску здійснюється шляхом вимірювання тиску газу, який прокачується по трубці, зануреної на фіксовану глибину в рідину, що заповнює резервуар, називають *п'езометричними*.

Схема п'езометричного рівнеміра наведена на рис.16.4 д. П'езометрична трубка 1 розміщується в апараті, у якому вимірюється рівень. Газ надходить у трубку через дросель 2, що обмежує величину витрати. Для вимірювання витрати газу служить стаканчик 3 (витрата за допомогою стаканчика визначається за кількістю пухирців, які побулькують через рідину, що заповнює його, за одиницю часу), а тиск підтримується постійним за допомогою стабілізатора тиску 4. Тиск газу після дроселя вимірюється дифманометром 5 і служить мірою рівня.

При подачі газу тиск у п'езометричній трубці поступово підвищується до того часу, доти зазначений тиск не стане дорівнювати тиску стовпа рідини висотою h . Коли тиск у трубці стане дорівнювати гідростатичному тиску, з нижнього відкритого кінця трубки починає виходити газ. Витрату підбирають такою, щоб газ залишав трубку у вигляді окремих пухирців (приблизно один пухирець у секунду).

При більшій витраті тиск, вимірюваний дифманометром, може бути трохи більшим, ніж гідростатичний, через додаткове падіння тиску, що виникає за рахунок тертя газу об стінки трубки при його проходженні. При дуже малій витраті газу збільшується інерційність вимірювання. Обидва фактори можуть збільшити похибку вимірювання рівня.

П'єзометричні рівнеміри дозволяють вимірювати рівень у широких межах (від декількох десятків сантиметрів до 10 – 15 м). При використанні для вимірювання тиску в п'єзометричній трубці дифманометра з уніфікованим вихідним сигналом мають відносну наведену похибку $\pm(1,0 - 1,5)\%$.

Точність вимірювання рівня п'єзометричними рівнемірами може бути істотно збільшена, якщо за засіб вимірювання гідростатичного тиску використати автоматичний цифровий манометр дискретно – безперервної дії.

Завдяки простоті реалізації на базі п'єзометричних рівнемірів, оснащених цифровими манометрами дискретно-безперервної дії, розроблені і вагоміри.

16.6. Електричні засоби вимірювання рівня

За видом чутливого елемента електричні засоби вимірювання рівня поділяють на *ємнісні* і *кондуктометричні*.

Ємнісні рівнеміри. У рівнемірах цього типу використовується залежність електричної ємності чутливого елемента первинного вимірювального перетворювача від рівня рідини. Конструктивно ємнісні чутливі елементи виконують у вигляді коаксіально розміщених циліндричних електродів або паралельно розміщених плоских електродів. Конструкція ємнісного чутливого елемента з коаксіально розміщеними електродами визначається фізико – хімічними властивостями рідини. Для неелектропровідних (діелектричних) рідин – рідин, що мають питому електропровідність менше 10^{-6} См/м, застосовують рівнеміри, оснащені чутливим елементом, схеми якого наведені на рис.16.5. Одиницею електропровідності в *SI* служить сименс (См) – величина, обернена ому (Ом).

Чутливий елемент (рис.16.5 *a*) складається із двох коаксіально розміщених електродів 1 і 2, частково занурених у рідину. Електроди утворюють циліндричний конденсатор, міжелектродний простір якого до висоти h заповнено рідиною, а простір $H - h$ – пароговатою сумішшю. Для фіксування взаємного розміщення електродів передбачений ізолятор 3.

У загальному вигляді електрична ємність, Φ , циліндричного конденсатора визначається рівнянням:

$$C_{II} = C_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot H}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \cdot \left[1 + (\epsilon_{жс} - 1) \cdot \frac{h}{H} \right] \quad (16.5)$$

де ε – відносна діелектрична проникність міжелектродної речовини; ε_0 – діелектрична проникність вакууму; $\varepsilon_{ж}$ – діелектрична проникність рідини; C_0 – ємність прохідного ізолятора (величина постійна); H – висота електродів; D, d – діаметри відповідно зовнішнього і внутрішнього електродів.

Для циліндричного конденсатора, міжелектродний простір якого заповнюється речовинами, які мають різні діелектричні проникності, відповідно до рис.16.5 а повна ємність C_{Π} визначається виразом:

$$C_{\Pi} = C_0 + C_1 + C_2, \quad (16.6)$$

де C_0 – ємність прохідного ізолятора; C_1 – ємність міжелектродного простору, заповненого рідиною; C_2 – ємність міжелектродного простору, заповненого парогазовою сумішшю.

Для виключення впливу температури рідини на результат вимірювання застосовують компенсаційний конденсатор (рис.16.5 в). Компенсаційний конденсатор 1 розміщується нижче ємнісного чутливого елемента 2 і повністю занурений у рідину. У певних випадках при сталості складу рідини його замінюють конденсатором постійної ємності.

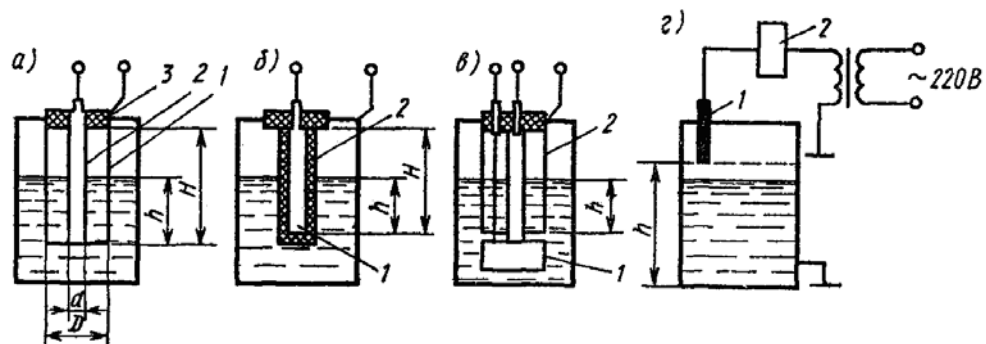


Рис. 16.5. Схеми електричних рівнемірів

Для вимірювання рівня електропровідних рідин – рідин з питомою провідністю більше 10^{-4} См/м – застосовують рівнеміри, оснащені ємнісним чутливим елементом, зображеним на рис.7.5 б. Чутливий елемент являє собою металевий електрод 1, покритий фторопластовою ізоляцією 2. Електрод частково занурений у рідину. Як другий електрод використовується або стінка резервуара, якщо вона металева, або спеціальний металевий електрод, якщо стінка резервуара виконана з діелектрика.

Перетворення електричної ємності чутливих елементів у сигнал вимірювальної інформації здійснюється мостовим, резонансним або імпульсним методом.

У ємнісних рівнемірах перетворення ємності здійснюється імпульсним методом, у реалізації якого використовуються перехідні процеси, що

проходять у чутливому елементі, який вмикається періодично до джерела постійної напруги.

Ємнісні рівнеміри випускаються класів точності 0,5; 1,0; 2,5. Їх мінімальний діапазон вимірювання становить 0 – 0,4 м, максимальний 0 – 20 м; тиск робочого середовища 2,5 – 10 МПа; температура від мінус 60 до плюс 100°C або від 100 до 250°C. На базі розглянутих ємнісних чутливих елементів розроблені вибухобезпечні сигналізатори рівня поділу рідин «нафтопродукт – вода» та інших рідин з різними значеннями відносної діелектричної проникності. При довжині зануреної частини чутливого елемента 0,25 м похибка спрацьовування сигналізатора ± 10 мм.

Розроблено ємнісні рівнеміри сипучих середовищ. Верхні межі вимірювання рівнемірів обмежені значеннями 4 – 20 м. Клас точності 2,5.

Кондуктометричні сигналізатори рівня. Рівнеміри цього виду призначені для сигналізації рівня електропровідних рідких середовищ і сипучих середовищ із питомою провідністю більше 10^{-3} См/м. На рис.7.5 з наведена схема сигналізатора верхнього граничного рівня рідини. Відповідно до схеми при досягненні рівнем значення h замикається електричний ланцюг між електродом 1 і корпусом технологічного апарата, при цьому спрацьовує реле 2, контакти якого увімкнені в схему сигналізації.

Принцип дії кондуктометричних сигналізаторів рівня сипучих середовищ аналогічний розглянутому. Електроди, застосовувані в кондуктометричних сигналізаторах рівня, виготовляють зі сталі спеціальних марок або вугілля. Причому вугільні електроди використовуються тільки при вимірюванні рівня рідких середовищ.

16.7. Акустичні засоби вимірювання рівня

На даний час запропоновані різні принципи побудови акустичних рівнемірів, з яких великого поширення дістав принцип локації.

Відповідно до цього принципу вимірювання рівня здійснюють за часом проходження ультразвуковими коливаннями відстані від випромінювача до межі поділу двох середовищ і зворотно до приймача випромінювання. Локація межі поділу двох середовищ здійснюється або з боку газу, або з боку робочого середовища (рідини або сипучого матеріалу). Рівнеміри, у яких локація межі поділу двох середовищ здійснюється через газ, називають *акустичними*, а рівнеміри з локацією межі поділу двох середовищ через прошарок робочого середовища – *ультразвуковими*.

Перевагою акустичних рівнемірів є незалежність їх показань від фізико – хімічних властивостей і складу робочого середовища. Це дозволяє використовувати їх для вимірювання рівня неоднорідних, таких, що кристалізуються і випадають в осадок рідин. До недоліків необхідно віднести вплив на показання рівнемірів температури, тиску і складу газу.

Як правило, акустичні рівнеміри являють собою поєднання первинного, проміжного, а у певних випадках і передавального вимірювального перетворювача. Тому акустичні рівнеміри слід розглядати як частину вимірювальної системи з акустичними вимірювальними перетворювачами.

На рис.16.6 наведена схема акустичного рівнеміра рідких середовищ. Рівнемір складається з первинного *I* і проміжного *II* перетворювачів. Первинний перетворювач являє собою п'єзоелемент, що виконує одночасно функції джерела і приймача ультразвукових коливань. При вимірюванні генератор з певною частотою виробляє електричні імпульси, які перетворюються п'єзоелементом *I* в ультразвукові імпульси. Останні поширюються уздовж акустичного тракту, відбиваються від межі поділу рідина – газ і приймаються тим самим п'єзоелементом, що перетворює їх в електричні імпульси.

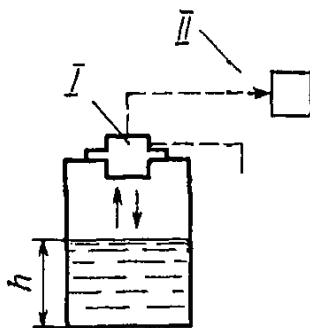


Рис. 16.6. Схема акустичного рівнеміра

Відстань між первинним і проміжним перетворювачами – не більше 25 м. Діапазони вимірювання рівня 0 – 3 м. Клас точності 2,5. Температура контрольованого середовища 10 – 50°C, тиск у технологічному апараті до 4 МПа.

Акустичні рівнеміри сипучих середовищ за принципом дії і будовою аналогічні акустичним рівнемірам рідких середовищ.

16.8. Радіоізотопні рівнеміри

Для безперервного вимірювання рівня рідин (агресивних, горючих та ін.) без зіткнення з ними можуть бути застосовані *радіоізотопні* рівнеміри,

дія яких базується на пропущенні через резервуари з рідиною γ – променів радіоізоотопів певних речовин. Якщо об'єкт вимірювання помістити між випромінювачем (радіоізоотопом) і приймачем випромінювання (лічильником ядерних часток), розміщеними в одній горизонтальній площині, то в момент проходження через цю площину контрольованого рівня рідини буде відбуватися різка зміна інтенсивності γ – променів, які надходять на приймач, внаслідок зміни поглинальної здатності середовища. Ця властивість поглинання випромінювання використовується для синхронного переміщення (спостереження) випромінювача і приймача слідом за рівнем у резервуарі.

Радіоізоотопні рівнеміри випускаються з діапазоном показань від 0 – 10 м. Швидкість спостереження за рівнем, що змінюється, становить 100 мм/хв. Основна абсолютна похибка приладу ± 10 мм. Рівнемір живиться від мережі змінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц. Споживана приладом потужність 50 В·А. Відстань, що допускається, між первинним і проміжним перетворювачем 50 м і між проміжним перетворювачем і вторинним приладом 1000 м.

Експлуатація радіоізоотопних рівнемірів проводиться у строгій відповідності до інструкції підприємства – виробника і санітарних вимог. Через небезпеку для обслуговуючого персоналу радіаційного опромінення зазначені рівнеміри мають обмежене застосування.

Запитання для самоконтролю до теми 16

1. Які Ви знаєте візуальні засоби вимірювання рівня?
2. Принцип роботи поплавкових засобів вимірювання рівня.
3. Принцип роботи буйкових засобів вимірювання рівня.
4. Принцип роботи гідростатичних засобів вимірювання рівня.
5. Принцип роботи електричних засобів вимірювання рівня.
6. Принцип роботи акустичних засобів вимірювання рівня.
7. Принцип роботи радіоізоотопних рівнемірів.

Тема 17. Вимірювання хімічного складу і концентрації рідини

План

17.1. Наукові розробки в галузі вимірювань складу та властивостей газів і рідин

17.2. Загальні поняття

17.3. Вимірювання фізико-хімічних параметрів рідин і газів

17.1. Наукові розробки в галузі вимірювань складу та властивостей газів і рідин

Дослідження в галузі вимірювання складу та властивостей газів і рідин на кафедрі почалися на початку 60 років вже минулого століття. В різні роки свій внесок в розвиток цього напрямку внесли Фабрі Л. П., Пістун Є. П., Кос В. М., Теплох З. М., Брилинський Р. Б., Кісіль І. С., Древецький В. В., Данельська Л. П., Кріль Б. А., Кулик М. П., Вашкурак Ю. З., Савицький В. К., Крих А. Б., Дубіль Р. Я., Ділай І. В.

Один з основних методів вимірювання складу та властивостей газів та рідин, який розроблявся на кафедрі, це газогідродинамічний дросельний метод. При цьому окремо досліджувалися гідродинамічний дросельний метод і газодинамічний дросельний метод. Останній метод доповнювався іншими методами: хімічним (Брилинський Р. Б.), тепловим (Кріль Б. А.) та акустичним (Савицький В. К.).

Перші дослідження в даному напрямку стосувались розробки газодинамічного дросельного густиноміра природного газу (Фабрі Л. П.), відтак – аналізаторів складу бінарних газових сумішей (Пістун Є. П., Теплох З. М.), а також пристроїв для контролю сил поверхневого натягу рідин (Кісіль І. С.).

Теплові газодинамічні аналізатори складу бінарних газових сумішей ТГДА–1, ТГДА–2, ТГДА–3 (Кріль Б. А.) застосовуються для метрологічних цілей і високоточного аналізу азотно-аргонової суміші в технологічному процесі наповнення ламп розжарення. Аналізатор АПГС –1, розроблений на цьому ж принципі, застосовується для аналізу високоагресивних парогазових сумішей в технологіях виготовлення волоконних світловодів.

Паралельно розроблялись гідродинамічні дросельні (капілярні) вимірювачі малих витрат рідин (Кос В. М., Данельська Л. П.), динамічної

в'язкості рідин (Пістун Є. П., Данельська Л. П.), кінематичної в'язкості рідин (Яцук А. П.), ступеня розпушення азбесту в водяному середовищі (Кос В. М., Древецький В. В.), фізико-механічних параметрів розчинів каучуку (Пістун Є. П., Кулик М. П.), а також реологічних характеристик неньютонівських речовин, зокрема бурових розчинів (Пістун Є. П., Крих А. Б.).

Гідродинамічні дросельні вимірювачі фізико-механічних параметрів розчинів загущених нафтопродуктів, їх абсолютної динамічної в'язкості та густини впроваджено на деяких українських нафтопереробних заводах, що мають супутні виробництва бітуму та ряду загущених нафтопродуктів. Гідродинамічні дросельні вимірювачі реологічних характеристик неньютонівських речовин: пластичної в'язкості та граничної напруги зсуву бурових розчинів знайшли широке впровадження на бурових установках в Україні (Полтавська область та Причорномор'я).

Загальну ж теорію газогідродинамічного дросельного методу вимірювання та принципи побудови засобів контролю фізико –механічних параметрів речовин розроблено в восьмидесятих роках (Пістун Є. П.). Розроблено основи формалізації синтезу дросельних вимірювальних схем, зокрема із застосуванням для опису побудови цих схем нового математичного апарату (розширена теорія впорядкованих множин), алгоритми синтезу структур і принципи моделювання дросельних схем, що дозволило встановити залежності функціональних можливостей газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів від структури дросельної схеми, типу та кількості застосованих в ній дроселів, режиму живлення схеми тощо.

Велика робота проведена з визначення витратних характеристик окремих дросельних елементів: експериментальні дослідження та їх математичний опис (Пістун Є. П., Теплюх З. М., Стасюк І. Д., Ділай І. В.). Розроблено та атестоване устаткування для дослідження таких характеристик.

Введено поняття рівності газодинамічних опорів дроселів на одному і різних газах та розроблені пристрої для встановлення рівності опорів дроселів на одному та різних газах (Пістун Є. П., Теплюх З. М.). З допомогою цих пристроїв здійснений підбір рівних і кратних за опором (провідністю) дроселів синтезаторів газових сумішей, що суттєво зменшило похибку задання концентрацій компонентів порівняно з відомими синтезаторами. Такий підхід уможливив нові методи побудови газодинамічних дросельних

систем і, зокрема, розроблення нових методів точного синтезу багатокомпонентних газових сумішей з широким діапазоном концентрацій і нових методів атестації газоаналітичної апаратури (Теплюх З. М., Ділай І. В.).

На базі нових методів синтезу газових сумішей з використанням дроселів з рівними і кратними газодинамічними опорами (провідностями) розроблено (Теплюх З. М.) методи калібрування хроматографів і оцінювання впливу супутніх компонентів на результат вимірювання, що суттєво зменшило похибку визначення концентрації компонентів хроматографами. Розроблені синтезатори багатокомпонентних газових сумішей для калібрування хроматографів димових газів та природного газу, відносна похибка задання концентрації компонентів яких для різних діапазонів концентрацій (в межах 0,001...100 %об.) знаходиться в межах 0,05...0,5 %відн.

Синтезатори газових сумішей, в тому числі для синтезу зразкових сумішей метан –повітря з метою перевірки аналізаторів шахтної атмосфери та швидкості зміни концентрації метану в суміші (Дубіль Р.Я.) впроваджені на багатьох шахтах, зокрема Львівського вугільного басейну (м. Червоноград).

Розроблені (Кріль Б. А., Кріль О. В.) також принципи побудови синтезаторів газових сумішей з великою продуктивністю (до 28 м³/годину) для технологій виготовлення сучасних ламп розжарення. Такі синтезатори впроваджені на ВАТ «Іскра».

17. 2. Загальні поняття

Широко застосовуються електрохімічні методи, до яких належать кондуктометричні, кулонометричні та полярографічні методи.

Кондуктометричний метод базується на використанні резистивних електролітичних перетворювачів і широко застосовується для вимірювання концентрації солей, лугів чи кислот у водних чи інших рідких електропровідних розчинах (концентратоміри, солеміри), для вимірювання концентрації газів за зміною електропровідності розчину при поглинанні ним проби аналізованого газу (газоаналізатори), а також для вимірювання вологості в твердих, рідких і газоподібних середовищах (вологоміри).

У лабораторній практиці часто для вимірювання концентрації електролітів використовують зрівноважені мости, в одне з плеч якого вмикають вимірювальну комірку (перетворювач), що являє собою скляну

посудину з двома плоскопаралельними електродами, між якими знаходиться досліджуваний розчин (рис.17.1). Переважно значення опорів резисторів R_1 і R_2 в цій схемі вибирають однаковими, а схему урівноважують за допомогою магазину опорів R_m . Тоді для зрівноваженого моста вимірюваний опір R_x перетворювача буде дорівнювати R_m .

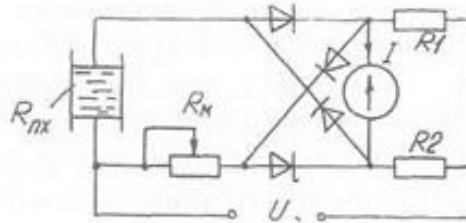


Рис.17.1. – Лабораторний кондуктометричний концентромір

На рис. 17.2 зображена схема промислового кондуктометричного концентроміра для вимірювань концентрації проточної рідини, що складається з резистивного електрохімічного перетворювача, виконаного у вигляді двох плоскопаралельних пластин, поміщених у досліджуваний розчин. Перетворювач увімкнений в одне з плеч автоматичного моста змінного струму. Резистори R_4 , R_0 , R_1 , R_2 , що утворюють інші три плеча моста, виготовлені з манганінового дроту. Для зменшення температурної похибки паралельно до плеча R_4 вмикають терморезистор R_k , поміщений в досліджуваний розчин.

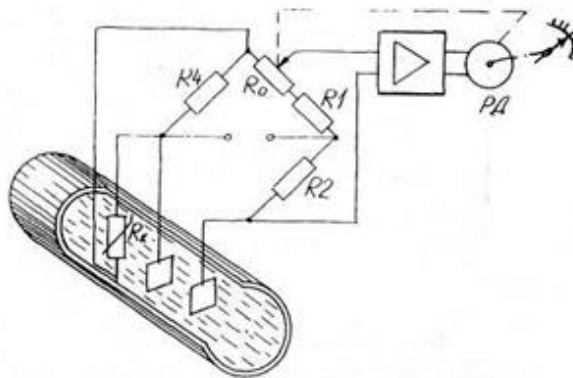


Рис. 17.2. – Схема промислового кондуктометричного концентроміра

Під час аналізу агресивних розчинів використовують безелектродні (безконтактні) кондуктометричні концентроміри, перевагою яких є відсутність електродів, які могли б поляризуватись чи забруднюватись. Це підвищує надійність і точність безконтактних концентромірів.

Кулонометричний метод оснований на вимірюванні кількості електрики чи струму під час електролізу досліджуваної речовини. Фізико-хімічною основою кулонометрії є закон Фарадея:

$$m = \frac{Mit}{96500n} \quad (17.1)$$

де m – маса виділеної речовини в процесі її електролізу, г; M – мольна маса даної речовини; I – сила струму, А; t – час електролізу, с; n – кількість електронів, які беруть участь в окисленні чи відновленні одного моля речовини.

17.3. Вимірювання фізико-хімічних параметрів рідин і газів

17.3.1. Загальні відомості

До фізико-хімічних властивостей, автоматичний контроль яких здійснюється в хіміко-технологічних процесах, відносять *густину, в'язкість, коефіцієнт заломлення, тиск насиченої пари, теплоту згорання*.

Вимірювання густини рідин і газів здійснюється з метою керування хіміко-технологічними процесами і виконання операцій обліку кількості сировини, палива, реагентів і готової продукції.

Для хіміко-технологічних процесів, пов'язаних з виробництвом нафтових масел, консистентних змащень, полімерів, розчинників, в'язкість є показником, що однозначно визначає якість продукції. Тому її автоматичне вимірювання дозволяє створювати дуже ефективні системи автоматичного керування названими вище процесами.

Для певних видів продукції хіміко-технологічних процесів потрібне вимірювання коефіцієнта заломлення як однієї з величин, що визначає якість.

Для світлих нафтопродуктів (особливо для авіаційних і автомобільних бензинів) однією з важливих властивостей є тиск насиченої пари (пружність пари), що характеризує схильність цих нафтопродуктів до випаровування і утворення парових пробок у паливних системах двигунів. Для рідких однокомпонентних речовин значення тиску насиченої пари може використовуватися як характеристика їх чистоти.

Теплова цінність рідких і газоподібних палив, які використовуються у вогневих нагрівальних і реакційних апаратах хіміко-технологічних процесів, визначається теплотою їхнього згорання. Автоматичне вимірювання цієї фізико-хімічної властивості в цей час набуває надзвичайно важливого значення у зв'язку із проведеними заходами щодо економії паливно-енергетичних ресурсів.

17.3.2. Засоби вимірювання густини рідин і газів

Густиною ρ речовини називають фізичну величину обумовлену відношенням маси m речовини до займаного ним об'єму V :

$$\rho = \frac{m}{V} [\text{одиниця маси}] / [\text{одиниця об'єму}]. \quad (17.2)$$

Питоною вагою γ речовини називають фізичну величину, обумовлену відношенням ваги G речовини до її об'єму V :

$$\gamma = \frac{G}{V} [\text{одиниця сили}] / [\text{одиниця об'єму}]. \quad (17.3)$$

Питома вага і густина зв'язані співвідношенням

$$\gamma = \rho \cdot g = m \cdot g / V, \quad (17.4)$$

де g – місцеве прискорення вільного падіння.

У той час як густина тіла не залежить від його місцезнаходження на поверхні Землі, питома вага змінюється залежно від розташування тіла на земній кулі. Тому довідкові дані розміщують за густиною.

У деяких випадках використовується поняття відносної густини, обумовлене як відношення густини даної речовини до густини іншої (умовної) речовини за певних фізичних умов.

Відносну густину рідкої речовини прийнято виражати відношенням її густини, узятої при нормальній температурі (20°C), до густини дистильованої води при температурі 4°C і позначається ρ_4^{20} .

Відносну густину газу прийнято виражати відношенням його густини до густини сухого повітря, узятого за нормальних умов (нормальна температура – $293,15\text{ K}$, нормальний тиск – $101,325\text{ кПа} = 760\text{ мм рт. ст.}$).

Густина рідин і газів зменшується з підвищенням температури. Густина газів збільшується з підвищенням тиску, густина рідини практично від тиску не залежить. У багатьох важливих для практики випадках густина можна розглядатися як адитивна фізична властивість.

Засоби вимірювання густини часто називають **денсиметрами** (денситометрами) (від лат. *densus* – густий і від грец. *metréō* – вимірюю).

Для вимірювання густини в цей час застосовуються *вагові денсиметри, поплавкові, гідроаеростатичні, гідрогазодинамічні, радіоізотопні, акустичні, вібраційні* та ін.

Далі розглянемо найбільш широко застосовувані автоматичні денсиметри рідин і газів.

Вагові (піннометричні) денсиметри. Принцип дії цих механічних денсиметрів полягає в безперервному зважуванні постійного об'єму аналізованої речовини у певній ємності або трубопроводі, тобто відповідно до виразів (17.1) – (17.3) густина визначається через питому вагу.

Схема найпоширенішого вагового денсиметра рідин показана на рис.17.3. Чутливим елементом денсиметра є U-подібна трубка 7, виготовлена з нержавіючої сталі, з'єднана через тягу 3 з важелем 4. Кінці трубки 7 через сильфони 2 з'єднані з нерухомими патрубками 1, через які подається аналізована рідина.

Наявність сильфонів 2 дозволяє трубці 7 обертатися навколо осі 0 – 0. При збільшенні густини рідини збільшується маса трубки з рідиною, що через важіль 4 передається до механоелектричного або механо пневматичного перетворювача 5, побудованого за принципом компенсації сил, вихідний сигнал $S_{вих}$ якого пропорційний зміні густини аналізованої рідини. Противага 6, яка укріплена на важелі 4, служить для зрівноважування моменту сил, створюваного трубкою 7 з рідиною при обраній нижній межі вимірювання густини. Пристрій 8 служить для автоматичного введення виправлення до сигналу денсиметра залежно від температури аналізованої рідини, яку цей пристрій безупинно вимірює.

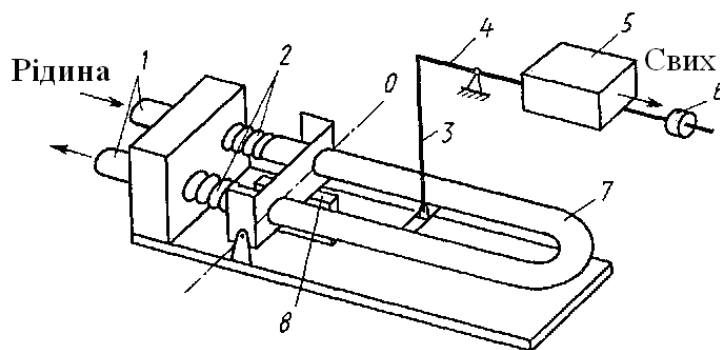


Рис. 17.3. Схема вагового денсиметра

Денсиметри даної конструкції дозволяють вимірювати густину в інтервалі $0,5-2,5 \text{ г/см}^3$. При цьому може бути встановлений діапазон вимірювання $0,05-0,3 \text{ г/см}^3$ у будь-якій частині зазначеного інтервалу. Максимальна температура аналізованої рідини 100°C , класи точності 1–1,5.

Поплавкові (ареометричні) денсиметри. Принцип дії цих механічних денсиметрів побудований на безперервному вимірюванні виштовхувальної (підйомної) сили, яка діє на поплавця, частково або повністю зануреного в аналізовану речовину.

На рис.17.4 показана схема поплавкового денсиметра рідин із частково зануреним поплавцем 2, розміщеним у ємності 1. Через цю ємність безупинно прокачується аналізована рідина. За рахунок переливання в ємності підтримується постійний рівень. Аналізована рідина витікає із

денсиметра через збірник 3. При зміні густини рідини змінюється ступінь занурення поплавця 2 у ємність. Досягнення положення рівноваги сил N і G_{II} забезпечується глибиною занурення поплавця, при цьому змінюється довжина l стрижня 4, зануреного в рідину. Переміщення поплавця 2 перетворюється в електричний сигнал за допомогою диференціального трансформатора 5.

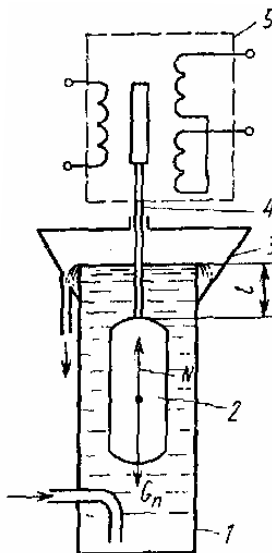


Рис. 17.4. Поплавковий денсиметр

Вага поплавця 2 зі стрижнем 4 (у повітрі) G_{II} і виштовхувальна сила N , діюча на поплавець, описуються виразами:

$$\begin{aligned} G_{II} &= m \cdot g, \\ N &= (V + l \cdot S) \cdot \rho \cdot g, \end{aligned} \quad (17.5)$$

де m – маса поплавця і стрижня; V – об’єм поплавця; l – довжина ділянки стрижня, зануреного в рідину; S – площа поперечного перерізу стрижня.

При рівності сил G_{II} і N з виразу (17.4) з урахуванням дії на стрижень на поверхні поділу фаз сил поверхневого натягу можна визначити величину ходу стрижня l . Як бачимо, довжина l , а отже, і сигнал диференціального трансформатора 5 однозначно пов’язані із густиною рідини. Масу m підбирають залежно від діапазону вимірювання.

Існує багато різних конструкцій денсиметрів із частково зануреним поплавцем. Вони мають високу чутливість, що дозволяє здійснювати вимірювання густини у вузькому діапазоні (усього $0,005$ – $0,01$ г/см³) з похибкою $\pm(1,5$ – $3)\%$ від діапазону вимірювання.

Гідро- і аеростатичні денсиметрии. Принцип дії цих механічних денсиметрів побудовано на залежності тиску P стовпа аналізованої рідини або газу від густини ρ цих середовищ:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \quad (17.6)$$

де H – висота стовпа рідини або газу.

Якщо значення H взяти постійним, то тиск P однозначно визначається густиною середовища.

Схема гідростатичного денсиметра, принцип дії якого побудовано на вимірюванні гідростатичного тиску методом продувки стисненого газу, показана на рис.17.5. Такі денсиметри використовуються в хіміко–технологічних процесах для вимірювання густини безпосередньо в технологічних апаратах. В апараті 7 установлені трубки 1 і 2 з різною глибиною занурення.

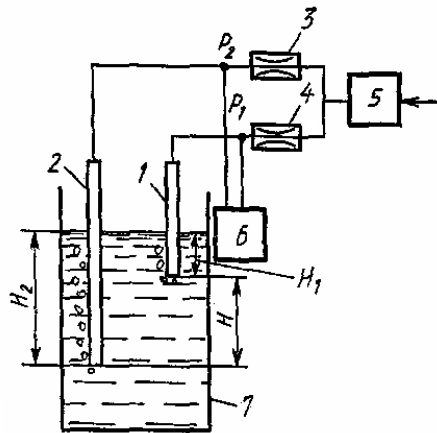


Рис.17.5. Схема гідростатичного денсиметра

Газ (звичайне повітря) від регулятора витрати 5 надходить до пневматичних дроселів 3 і 4, а потім до трубок 2 і 1. Через відкриті торці трубок газ барботує через рідину. Тиск газу в трубках 1 і 2 визначається гідростатичним тиском стовпа рідин висотою H_1 і H_2 . Різниця тисків у трубках вимірюється дифманометром 6 із пневматичним або електричним вихідним сигналом. Цей перепад визначається виразом:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = (H_2 - H_1) \cdot \rho \cdot g = H \cdot \rho \cdot g \quad (17.7)$$

Наявність двох трубок дозволяє виключити вплив на результат вимірювання можливих змін рівня рідини в апараті.

Одним з найбільш удосконалених і чутливих є аеростатичний денсиметр (рис.17.6), у якому використовується комбінація механічного і теплового ефектів.

Аналізований газ із постійною об'ємною витратою надходить у трубку 2, а в трубку 3 при постійному тиску надходить допоміжний газ (звичайне повітря). Газові потоки виводяться через трубку 1. Трубки 1, 2 і 3 розміщені вертикально. При зміні густини аналізованого газу змінюється аеростатичний

тиск стовпа газу в трубці 2, а отже, і тиск у точці *A*. Тому змінюється витрата повітря, яке обвітряє резисторний вимірювальний термоанемометр R_B , у результаті чого змінюється його опір.

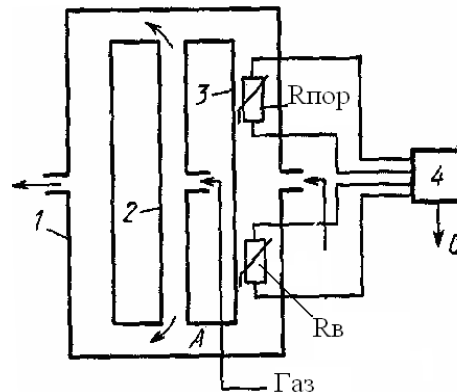


Рис. 17.6. Аеростатичний денсиметр

Опір порівняльного термоанемометра $R_{пор}$ залишається постійним, тому що потік повітря, яке його обвітряє, практично не змінюється. Зміна опору термоанемометра R_B спричиняє розбаланс U нерівноважного мосту 4. Цей розбаланс описується виразом:

$$U = K \cdot (\rho - \rho_0), \quad (17.8)$$

де K – коефіцієнт перетворення денсиметра; ρ_0 – густина повітря.

Денсиметр термостатується при температурі 40 або 45°C, і забезпечує вимірювання густини в межах 0 – 3 кг/см³ з діапазоном вимірювання, відліченим від значення густини повітря при 20°C, $\pm (0,01 - 1,5)$ кг/м³ і класами точності 2–5 (залежно від діапазону вимірювання).

Гідр-газо(аеро)динамічні денсиметри. Принцип дії цих механічних денсиметрів побудовано на наданні потоку аналізованої речовини додаткової кінетичної енергії і на вимірюванні параметрів, що характеризують ефекти, які виникають при цьому впливі. В основному зазначені денсиметри застосовуються для вимірювання малої за значенням густини газів.

На рис.17.7 показана спрощена схема газодинамічного денсиметра.

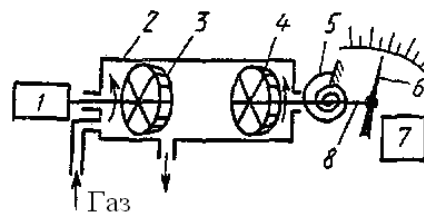


Рис.17.7. Аеродинамічний денсиметр

У денсиметрі потоку аналізованого газу, що проходить через камеру 2, надається кінетична енергія турбінкою 3, яка приводиться в обертний рух

синхронним двигуном 1. Потік газу надходить до турбинки 4 і створює на ній за рахунок своєї кінетичної енергії обертовий момент, який виражений формулою:

$$M = k \cdot \omega^2 \cdot \rho \quad (17.9)$$

де k – постійний коефіцієнт; ω – частота обертання турбинки 3.

Під дією цього моменту турбинка 4 повертається, а виникаючий на ній момент урівноважується моментом, створюваним на осі 8 плоскою пружиною 5. Кут повороту осі 8 і стрілки 6 за шкалою пропорційний густині газу. За допомогою перетворювача 7 кут повороту перетворюється в уніфікований сигнал. Клас точності розглянутого денсиметра 0,5 – 1,5 (залежно від діапазону вимірювання).

Вібраційні денсиметри. Принцип дії цих механічних денсиметрів побудовано на залежності параметрів пружних коливань (вібрації), які передаються камері з аналізованою речовиною або тілу, розміщеному в ньому, від густини цієї речовини. Звичайно як параметр пружних коливань використовується частота власних коливань резонатора, який перебуває в режимі автоколивань. Резонатори вібраційних денсиметрів виконують у вигляді трубки, пластини, стрижня, струни, камертона і т.д. Частота власних коливань резонатора, який знаходиться в аналізованій речовині, описується в загальному випадку виразом:

$$f = f_0 \cdot \sqrt{1/(1 + k \cdot \rho)} \quad (17.10)$$

де f_0 – частота коливань резонатора при початковому значенні густини аналізованої речовини; k – константа, що залежить від конструкції резонатора.

Конструктивно розрізняють *проточні* і *заглибні* вібраційні денсиметри. У перших аналізована речовина проходить через внутрішню порожнину резонатора, у других – резонатор розміщується в потоці аналізованої речовини, діапазон вимірювання даних денсиметрів 690–1050 кг/м³, температура рідини 10–100°C; абсолютна похибка вимірювання $\pm 1,5$ кг/м³.

17.3.3. Засоби вимірювання в'язкості рідин

В'язкість (внутрішнє тертя) – властивість рідких тіл (рідин і газів) чинити опір переміщенню однієї їх частини щодо іншої. Основний закон в'язкого потоку описується формулою Ньютона:

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{dW}{dn} \quad (17.11)$$

де F – тангенціальна (дотична) сила, що викликає зрушення шарів рідини (газу) одного відносно іншого; S – площа прошарку, за якою відбувається зрушення; d/dn – градієнт швидкості W потоку (швидкості зміни за прошарками) за нормаллю n .

Коефіцієнт пропорційності μ називають **динамічною в'язкістю**. Він характеризує опір рідини (газу) зсуву її шарів. Величину, зворотню динамічній в'язкості $\varphi = 1/\mu$, називають **текучістю**. Поряд з поняттям динамічної в'язкості використовують поняття **кінематичної в'язкості**:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (17.12)$$

Одиниця динамічної в'язкості в SI – Па·с, у системі СГС – П (пуаз); одиниця кінематичної в'язкості в SI – м²/с, у системі СГС – Ст (стокс). Співвідношення між названими одиницями 1П=10⁻¹ Па·с; 1ст = 10⁻⁴ м²/с.

В'язкість рідин зі збільшенням температури зменшується, а газів – збільшується. Динамічна в'язкість до тисків 20 МПа практично не залежить від тиску. В'язкість у загальному випадку не є адитивною фізичною властивістю.

Засоби вимірювання в'язкості називають **віскозиметрами**. На хіміко-технологічних процесах віскозиметри використовуються тільки для вимірювання в'язкості рідин. У цей час розроблені автоматичні *капілярні, ротаційні, вібраційні віскозиметри, віскозиметри з падаючим тілом* та ін. Далі розглянуті віскозиметри, найбільше часто застосовувані в хіміко – технологічних процесах.

Капілярні віскозиметри (віскозиметри витікання). Принцип дії цих механічних віскозиметрів побудований на закономірності витікання рідини через капіляр, що описується законом Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \mu \cdot l} (P_1 - P_2) \quad (17.13)$$

де Q – об'ємна витрата рідини; d і l – внутрішній діаметр і довжина капіляра; P_1, P_2 – тиск до і після капіляра за потоком.

З формули (17.12) бачимо, що для вимірювання динамічної в'язкості при постійній об'ємній витраті рідини досить вимірювати перепад тиску на капілярі.

На рис.17.8 показана схема капілярного віскозиметра, у якому для створення постійної об'ємної витрати аналізованої рідини використовується шестеренний насос 1, який приводиться у рух синхронним двигуном 2. З

насоса аналізована рідина надходить у змійовик 3, де нагрівається до температури масла, що заповнює термостат 6, а потім – у капіляр 4, розміри якого вибирають залежно від діапазону вимірюваних значень в'язкості.

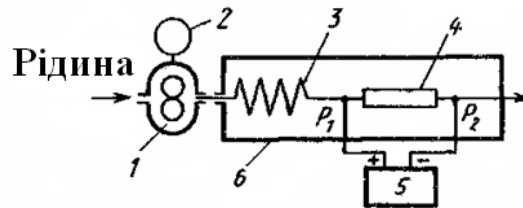


Рис.17.8. Схема капілярного віскозиметра

Перепад тисків на капілярі вимірюється дифманометром 5 із пневматичним або електричним уніфікованим вихідним сигналом, що пропорційний динамічній в'язкості аналізованої рідини. Температура в термостаті підтримується постійною і дорівнює 50 або 100⁰С. Діапазони вимірювання від 0 – 2 10⁻³ Па·с до 0 – 1000 10⁻³ Па·с. Класи точності віскозиметра 1,5–2,5 (залежно від діапазону вимірювання).

Віскозиметри з падаючим тілом (кулькові віскозиметри). Принцип дії цих механічних віскозиметрів побудований на вимірюванні швидкості (або часу) руху тіла (кульки) під дією сил ваги і тертя в аналізованій рідині. Цей рух описується законом Стокса:

$$W = 0,22 \cdot \frac{g \cdot (\rho_k - \rho) \cdot r^2}{\mu} \quad (17.14)$$

де W – швидкість рівномірного падіння кульки; ρ – густина вимірюваної рідини; $\rho_{ш}$ – густина матеріалу кульки ($\rho_k > \rho$); r – радіус кульки.

Звичайне вимірювання швидкості W зводиться до вимірювання відрізка часу τ , за який кулька, яка падає з постійною швидкістю, проходить певний постійний відрізок шляху l між двома взятими позначками. У цьому випадку:

$$\tau = \frac{l}{W} \quad (17.15)$$

На рис.17.9 показана схема кулькового віскозиметра циклічної дії.

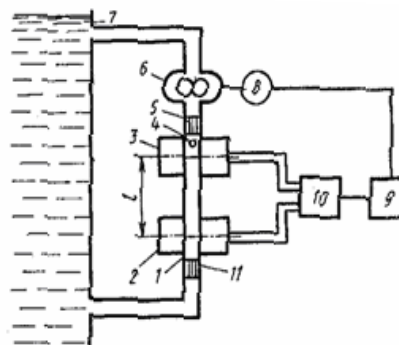


Рис.17.9. Віскозиметр з падаючим тілом

Аналізована рідина з апарата 7 або трубопроводу прокачується насосом 6 по трубці 1 з немагнітного матеріалу знизу нагору і при своєму русі піднімає кульку від нижньої 11 до верхньої 5 обмежувальної сітки. При вимиканні двигуна 8 насоса (періодичне вмикання і вимикання здійснюються блоком керування 9) кулька падає в аналізовану рідину. За допомогою диференціальних трансформаторів 3 і 2 формуються електричні імпульси в моменти часу, коли кулька проходить дві взяті позначки, що відстоять одна від одної по висоті трубки на відстані l .

За допомогою вимірювача тимчасових інтервалів 10 вимірюється відрізок часу між зазначеними імпульсами, значення яких і визначає динамічну в'язкість. Клас точності віскозиметра 2. Існують конструкції віскозиметрів з падаючим тілом безперервної дії.

Ротаційні віскозиметри. Принцип дії цих механічних віскозиметрів побудований на вимірюванні обертального моменту, який виникає на осі ротора (циліндра, диска і т.п.), зануреного у вимірювальне середовище, при взаємному їх переміщенні. Зазначений обертальний момент у загальному випадку описується виразом:

$$M = k \cdot \omega \cdot \mu \quad (17.16)$$

де k – постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора віскозиметра; ω – кутова швидкість обертання ротора (при постійній кутовій швидкості обертальний момент однозначно визначає в'язкість рідини).

З різноманітності конструкцій обертальних елементів ротаційних віскозиметрів в автоматичних аналізаторах найбільше використовуються конструкції, показані на рис.17.10.

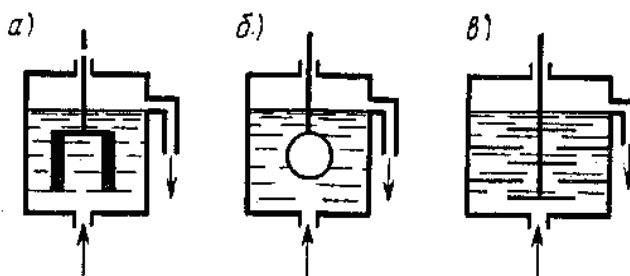


Рис. 17. 10 - Схеми ротаційних віскозиметрів

Дані віскозиметри поєднують загальний принцип дії, відповідно до якого в'язкість визначається за моментом сил тертя, який виникає при обертанні тіла, зануреного в аналізовану рідину. Таким тілом може бути циліндр (рис.17.10 а), кулька (рис.17.10 б) або диски, посаджені на загальний вал і розміщені між нерухомими шайбами (рис.17.10 в).

Диску або циліндру обертовий рух передається синхронним двигуном. Обертальний момент, що виникає на диску (циліндрі), а отже, на шківі, розміщеному на одному валу з диском (циліндром), пропорційний динамічній в'язкості.

Характерною рисою ротаційних віскозиметрів є широкий діапазон вимірюваних значень в'язкості (0,01–1000 Па·с). Класи точності ротаційних віскозиметрів 1–2,5.

Запитання для самоконтролю до теми 17

1. Які наукові розробки в галузі вимірювань складу та властивостей газів і рідин Ви знаєте?
2. Які Ви знаєте засоби вимірювання в'язкості рідин.
3. Яким чином відбувається вимірювання фізико–хімічних параметрів рідин і газів?

Тема 18. Вимірювальні інформаційні системи

План

18.1. Загальні відомості

18.2. Класифікація, функціональне призначення, особливості застосування ІВС різних типів

18.1. Загальні відомості

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) - сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів контролю, діагностування та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної та інших видів інформації з метою надання її споживачеві (в тому числі в АСК) у потрібному вигляді.

Інформаційно-вимірювальна система - це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів для отримання вимірювальної інформації, її перетворення, обробки з метою представлення споживачу (в тому числі введення в автоматичну систему керування – АСК) в необхідному вигляді або автоматичного здійснення логічних функцій контролю, діагностування, ідентифікації.

Призначення. Основне призначення ІВС - цілеспрямоване оптимальне проведення вимірювального процесу і забезпечення суміжних систем вищого рівня достовірною інформацією. Виходячи з цього основні функції ІВС наступні:

- отримання вимірювальної інформації з об'єкту дослідження;
- обробка, передача і подання вимірювальної інформації оператору або ЕОМ;
- запам'ятовування і зберігання вимірювальної інформації;
- формування керувальних впливів управління процесом вимірювання.

18.2. Класифікація ІВС

Найпоширенішою є класифікація ІВС за функціональною ознакою, за якою вони реалізуються у вигляді вимірювальних систем, систем автоматичного контролю, систем розпізнавання образів (ідентифікації), систем телевимірювання та ін.

Вимірювальна система – різновид інформаційно-вимірювальної системи у вигляді сукупності вимірювальних каналів, вимірювальних

пристроїв та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної інформації про декілька вимірюваних фізичних величин^[1]. Перераховані елементи вимірювальної системи об'єднані загальним алгоритмом функціонування для отримання даних про величини, що характеризують стан об'єкта дослідження.

Інформаційні системи можуть бути складовими розвиненіших структур вимірювальних інформаційних систем і систем управління, на які покладаються функції контролю, діагностики, розпізнавання образів, автоматичного керування науковими експериментами, *випробуваннями складних об'єктів і технологічними процесами*.

18.2.1. Особливості систем автоматичного контролю

Система автоматичного контролю (автоматична система контролю) – вид інформаційно–вимірювальної системи, що забезпечує проведення контролю без участі людини і є основним джерелом інформації при управлінні автоматизованим виробництвом, зокрема, в складі систем автоматичного регулювання і автоматичних систем керування технологічними процесами.

Основне завдання системи автоматичного контролю – це встановлення відповідності між станом об'єкта і заданою нормою, а також у відтворенні судження про даний чи (і) про майбутній стан об'єкта. За допомогою таких систем вимірюють фізичні величини, що характеризують стан об'єкта, і результати вимірювань порівнюються зі значеннями, взятими за норму.

Функції систем автоматичного контролю. Для того, щоб отримати в результаті контролю інформацію про поточний стан об'єкту контролю та її співвідношення з параметрами нормального стану будь-яка система автоматичного контролю повинна виконувати наступні функції:

- вимірювальне перетворення – сприйняття вхідних величин та перетворення їх в сигнали для наступних операцій;
- формування і реалізація нормативних значень в аналоговому чи цифровому вигляді;
- порівняння вхідних величин чи функцій від них з нормативними;
- формування та видавання кількісного судження про контрольовану величину на об'єкті контролю;
- автоматичне керування роботою системи контролю.

Додатково на системи автоматичного контролю можуть покладатися наступні функції:

- аналогово-цифрове перетворення;
- індикації та/або реєстрації аналогової чи цифрової вимірювальної інформації;
- обчислювальні процедури над аналоговими чи цифровими сигналами;
- формування сигналів запиту чи компенсуючих впливів на об'єкт контролю, що необхідні для отримання інформації контролю;
- самотестування та самокалібрування систем контролю.

Загальний опис будови САК. Типова система автоматичного контролю в загальному випадку включає первинний вимірювальний перетворювач (датчик), вторинний перетворювач, лінію передачі інформації (сигналу) і реєструючий прилад. Часто система контролю має тільки чутливий елемент, перетворювач, лінію передачі інформації і вторинний (реєструючий) прилад.

При цьому проміжні результати вимірювань, що використовуються для відтворення суджень, можуть і не надходити на вихід системи. З цього погляду контроль є операцією стиску даних, усунення непотрібних у цьому випадку відомостей про об'єкт. Для відтворення судження про майбутній стан об'єкта система контролю повинна виконувати прогнозування на основі даних про попередні стани об'єкта, що отримані під час вимірювань, а також на основі його динамічних характеристик, відомих завдяки проведеним раніше дослідженням.

Основні складові елементи системи автоматичного контролю. Датчик, як правило, містить чутливий елемент, що сприймає величину вимірюваного параметра, а в деяких випадках і перетворює її в сигнал, зручний для дистанційної передачі на реєструючий прилад, а при необхідності – в систему регулювання.

Приклади:

1) Прикладом чутливого елемента може бути мембрана диференціального манометра, що вимірює різницю тиску на об'єкті. Переміщення мембрани, викликане зусиллям від різниці тиску, перетворюється за допомогою додаткового елемента (перетворювач) в електричний сигнал, який легко передається на реєстратор.

2) Інший приклад датчика – термопара, де суміщені функції чутливого елемента і перетворювача, оскільки на холодних кінцях термопари виникає електричний сигнал, пропорційний вимірюваній температурі.

Перетворювачі класифікуються на однорідні і неоднорідні. Перші мають однакову за фізичною природою вхідну і вихідну величину. Наприклад, підсилювачі, трансформатори, випрямлячі перетворюють електричні величини в електричні з іншими параметрами.

Серед неоднорідних найбільшу групу складають перетворювачі неелектричних величин в електричні (термопари, терморезистори, тензометричні датчики, п'єзоелементи тощо). За видом вихідної величини ці перетворювачі поділяються на дві групи: генераторні, що мають на виході активну електричну величину ЕРС, і параметричні – з пасивною вихідною величиною у вигляді R, L або C.

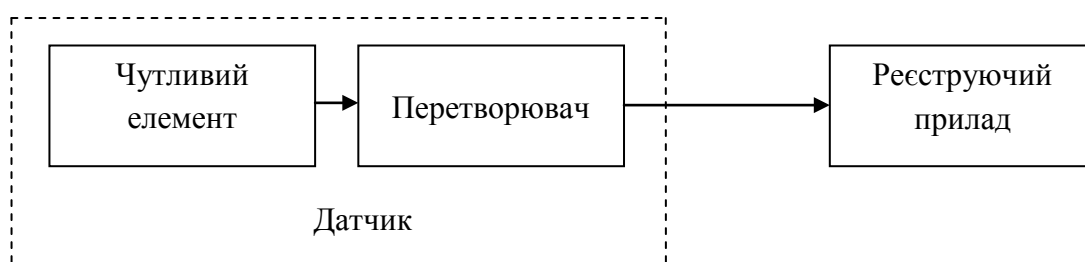


Рис. 18.1. Структурна схема системи автоматичного контролю систем технічного діагностування.

Терміни та визначення. Об'єкт технічного діагностування (контролю технічного стану) – виріб і (або) його складові частини, що підлягають (піддаються) діагностуванню (контролю).

18.2.2. Системи технічного діагностування

Засіб технічного діагностування (контролю технічного стану) – апаратура та програми, за допомогою яких здійснюється діагностування (контроль).

Система технічного діагностування (контролю технічного стану) – сукупність засобів, об'єкта та виконавців, необхідна для проведення діагностування (контролю) за правилами, встановленими технічною документацією.

Завдання технічного діагностування:

- визначення (розпізнання, оцінка) технічного стану, у якому перебуває об'єкт на момент діагностування;
- оцінка відповідності чи невідповідності технічного стану об'єкта діагностування та у разі невідповідності – визначення причини

невідповідності: несправності, дефекту, граничного ступеню зношеності, відхилення від регулювань тощо;

- виявлення ушкоджень чи дефектів на початковій стадії їх розвитку, виявлення конкретних дефектних вузлів чи деталей, визначення і усунення причин, що викликали дефект;
- оцінка допустимості та доцільності подальшої експлуатації обладнання з урахуванням прогнозування його технічного стану при виявленні дефекту, оптимізація режимів експлуатації, що дозволяє безпечно експлуатувати агрегат з виявленими дефектами до моменту його виводу у плановий ремонт;
- організація обслуговування та ремонту обладнання за технічним станом (замість регламентного обслуговування і ремонту), забезпечення підготовки та виконання якісних ремонтів.

Організація технічного діагностування. Для здійснення технічного діагностування виробу необхідно:

- встановити показники і характеристики діагностування;
- забезпечити пристосованість виробу до технічного діагностування;
- розробити діагностичне забезпечення виробу.

Забезпечення пристосованості виробу до технічного діагностування повинно проводитися відповідно до вимог ГОСТ 26656–85[3].

Показники та характеристики діагностування, вимоги щодо пристосованості виробу до діагностування та діагностичного забезпечення виробу повинні включатися до технічного завдання (ТЗ) стандартів на конкретні види продукції та документацію, що розробляється в процесі проведення дослідно–конструкторських робіт.

Види технічного діагностування. Види технічного діагностування за організацією в часі:

1) Періодичне технічне діагностування – діагностування (контроль), за якого надходження інформації про технічний стан об'єкта відбувається через встановлені інтервали часу.

2) Безперервне технічне діагностування – діагностування (контроль), за якого надходження інформації про технічний стан об'єкта відбувається безперервно.

3) Оперативне технічне діагностування – діагностування, за якого надходження інформації про технічний стан об'єкта відбувається із завідома заданою стратегією в процесі функціонування об'єкта.

Види технічного діагностування за методом впливу на об'єкт:

- тестове технічне діагностування - діагностування, під час якого на об'єкт подаються тестові впливи.
- робоче технічне діагностування - діагностування, під час якого на об'єкт подаються робочі впливи.
- систем розпізнавання образів (ідентифікації);

18.2.3. Системи розпізнавання образів

З розвитком обчислювальної техніки стало можливим вирішити ряд завдань, що виникають в процесі життєдіяльності, полегшити, прискорити, із завданням розпізнавання образів живі системи, у тому числі і людина, стикаються постійно з моменту своєї появи.

Зокрема, *інформація, що надходить з органів почуттів, обробляється мозком, який у свою чергу сортує інформацію, забезпечує прийняття рішення, а далі за допомогою електрохімічних імпульсів передає необхідний сигнал далі, наприклад, підвищити якість результату.* Наприклад, робота різних систем життєзабезпечення, взаємодія людини з комп'ютером, поява роботизованих систем та ін. Тим не менш, відзначимо, що забезпечити задовільний результат в деяких завданнях (розпізнавання подібних об'єктів, що швидко рухаються, рукописного тексту) на даний час не вдається.

Історія досліджень пов'язаних з розпізнаванням образів. Що таке розпізнавання образів?

Перші дослідження з обчислювальною технікою в основному слідували класичною схемою математичного моделювання – математична модель, алгоритм і розрахунок. Такими були задачі моделювання процесів відбуваються при вибухах атомних бомб, розрахунку балістичних траєкторій, економічних і інших додатків. Однак крім класичних ідей цього ряду виникали і методи засновані на зовсім іншій природі, і як показувала практика вирішення деяких завдань, вони часто давали кращий результат ніж рішення, засновані на надскладності математичних моделях. Їхня ідея полягала у відмові від прагнення створити вичерпну математичну модель досліджуваного об'єкта (причому часто адекватні моделі було практично неможливо побудувати), а замість цього задовольнятися відповіддю лише на конкретні цікаві для нас питання, причому ці відповіді шукати із загальних для широкого класу задач міркувань. До досліджень такого роду ставилися розпізнавання зорових образів, прогнозування врожайності, рівня річок,

завдання розрізнення нафтоносних і водоносних пластів за непрямим геофізичними даними і т. д. Конкретний відповідь у цих завданнях був потрібний в досить простій формі, як наприклад, належність об'єкта одному з заздалегідь фіксованих класів. А вихідні дані цих завдань, як правило, задавалися у вигляді уривчастих відомостей про досліджуваних об'єктах, наприклад у вигляді набору заздалегідь класифікованих об'єктів. З математичної точки зору це означає, що розпізнавання образів (а так і був названий в нашій країні цей клас задач) являє собою далеко, що йде узагальнення ідеї екстраполяції функції.

Важливість такої постановки для технічних наук не викликає ніяких сумнівів і вже це саме по собі виправдовує численні дослідження в цій області. Однак задача розпізнавання образів має і більш широкий аспект для природознавства (втім, було б дивно якщо щось настільки важливе для штучних кібернетичних систем не мало б значення для природних). У контекст даної науки органічно увійшли і поставлені ще древніми філософами питання про природу нашого пізнання, нашої здатності розпізнавати образи, закономірності, ситуації навколишнього світу. У дійсності, можна практично не сумніватися в тому, що механізми розпізнавання найпростіших образів, типу образів наближається небезпечною хижака або їжі, сформувалися значно раніше, ніж виник елементарний мову і формально-логічний апарат. І не викликає ніяких сумнівів, що такі механізми досить розвинені і у вищих тварин, яким так само в життєдіяльності вкрай необхідна здатність розрізнення досить складної системи знаків природи. Таким чином, в природі ми бачимо, що феномен мислення і свідомості явно базується на здібностях до розпізнавання образів і подальший прогрес науки про інтелект безпосередньо пов'язаний з глибиною розуміння фундаментальних законів розпізнавання.

Розуміючи той факт, що вище перелічені питання виходять далеко за рамки стандартного визначення розпізнавання образів (в англійській літературі більш поширений термін supervised learning), необхідно так само розуміти, що вони мають глибокі зв'язки з цим відносно вузьким (але все ще далеко невичерпними) напрямом. Вже зараз розпізнавання образів щільно увійшло в повсякденне життя і є одним з найбільш нагальних знань сучасного інженера. У медицині розпізнавання образів допомагає лікарям ставити більш точні діагнози, на заводах воно використовується для прогнозу шлюбу в партіях товарів. Системи біометричної ідентифікації особи в якості свого алгоритмічного ядра так само засновані на результатах цієї дисципліни.

Подальший розвиток штучного інтелекту, зокрема проектування комп'ютерів п'ятого покоління, здатних до більш безпосередньому спілкуванню з людиною на природних для людей мовах і за допомогою мови, немислимі без розпізнавання. Тут рукою подати і до робототехніки, штучних систем управління, що містять як життєво важливих підсистем системи розпізнавання.

Саме тому до розвитку розпізнавання образів з самого початку була прикута чимало уваги з боку фахівців самого різного профілю – кібернетиків, нейрофізіологів, психологів, математиків, економістів і т.д. Багато в чому саме з цієї причини сучасне розпізнавання образів саме живиться ідеями цих дисциплін. Не претендуючи на повноту (а на неї в невеликому есе претендувати неможливо) опишемо історію розпізнавання образів, ключові ідеї.

Розпізнавання образів (об'єктів, сигналів, ситуацій, явищ або процесів) – завдання ідентифікації об'єкта або визначення будь-яких його властивостей за його зображенням (оптичне розпізнавання) або аудіозапису (акустичне розпізнавання) та іншим характеристикам.

Одним з базових є не має конкретного формулювання поняття безлічі. У комп'ютері безліч представляється набором неповторюваних однотипних елементів. Слово "Неповторюваних" означає, що якийсь елемент у безлічі або є, або його там немає. Універсальне безліч включає всі можливі для розв'язуваної задачі елементи, порожнє не містить жодного.

Образ – класифікаційне угруповання в системі класифікації, об'єднуюча (Виділяє) певну групу об'єктів за деякою ознакою. Образи володіють характерною властивістю, що виявляється в тому, що ознайомлення з кінцевим числом явищ з одного і того ж безлічі дає можливість дізнаватися як завгодно велике число його представників. Образи мають характерні об'єктивними властивостями в тому сенсі, що різні люди, що навчаються на різному матеріалі спостережень, здебільшого однаково і незалежно один від одного класифікують одні й ті ж об'єкти. У класичній постановці завдання розпізнавання універсальна безліч розбивається на частини–образи. Кожне відображення якого–небудь об'єкта на сприймаючі органи системи, що розпізнає, незалежно від його положення щодо цих органів, прийнято називати зображенням об'єкта, а безлічі таких зображень, об'єднані яким–небудь загальними властивостями, являють собою образи.

Методика віднесення елемента до якогось образу називається вирішальним правилом. Ще одне важливе поняття – метрика, спосіб

визначення відстані між елементами універсальної множини. Чим менше ця відстань, тим більше схожими є об'єкти (Символи, звуки та ін) – те, що ми розпізнаємо. Звичайно елементи задаються у вигляді набору чисел, а метрика – у виді функції.

Від вибору представлення образів і реалізації метрики залежить ефективність програми, один алгоритм розпізнавання з різними метриками буде помилятися з різною частотою. Навчанням зазвичай називають процес вироблення в деякій системі тієї чи іншої реакції на групи зовнішніх ідентичних сигналів шляхом багаторазового впливу на систему зовнішньої коректування. Таку зовнішню коригування у навчанні прийнято називати "заохоченнями" і "покараннями".

Механізм генерації цього коректування практично повністю визначає алгоритм навчання. Самонавчання відрізняється від навчання тим, що тут додаткова інформація про вірність реакції системі не повідомляється.

Адаптація – це процес зміни параметрів і структури системи, а можливо – і управляючих впливів, на основі поточної інформації з метою досягнення певного стану системи при початковій невизначеності і умовах роботи що змінюються.

Навчання – це процес, в результаті якого система поступово набуває здатність відповідати потрібними реакціями на певні сукупності зовнішніх впливів, а адаптація – це підстроювання параметрів і структури системи з метою досягнення необхідної якості управління в умовах безперервних змін зовнішніх умов.

Приклади задач розпізнавання образів:

- розпізнавання букв;
- розпізнавання штрих-кодів;
- розпізнавання автомобільних номерів;
- розпізнавання осіб та інших біометричних даних;
- Розпізнавання мови

Методи розпізнавання образів розпізнавання образ штучний

В цілому, можна виділити три методи розпізнавання образів:

Метод перебору. У цьому випадку проводиться порівняння з базою даних, де для кожного виду об'єктів представлені всілякі модифікації відображення. Наприклад, для оптичного розпізнавання образів можна застосувати метод перебору виду об'єкта під різними кутами, масштабами, зміщеннями, деформаціями і т. д. Для букв потрібно перебирати шрифт,

властивості шрифту і т. д. У випадку розпізнавання звукових образів, відповідно, відбувається порівняння з деякими відомими шаблонами (наприклад, слово, вимовлене кількома людьми).

Другий підхід – виробляється більше глибокий аналіз характеристик образу. У разі оптичного розпізнавання це може бути визначення різних геометричних характеристик. Звуковий зразок в цьому випадку піддається частотному, амплітудному аналізу і т. д.

Наступний метод – використання *штучних нейронних* мереж (ІНС). Цей метод вимагає або великої кількості прикладів завдання розпізнавання при навчанні, або спеціальною структури нейронної мережі, що враховує специфіку даної задачі. Тим не менш, його відрізняє більш висока ефективність і продуктивність.

Загальна структура системи розпізнавання Структура – (від лат. “*structure*” – будова, розташування, порядок) внутрішня організація системи, що являє собою специфічний спосіб взаємозв'язку, взаємодії утворюючих його компонентів. Структура – це впорядкованість, організованість системи. Поняття структури вживається і в іншому, більш широкому смислі як сукупність необхідних і достатніх для досягнення мети відносин між елементами.

Поняття «**функція**» вживається в самих різних значеннях. Вона може означати здатність до діяльності і саму діяльність. Такий підхід до визначення функції розглядає її як спосіб прояву активності, життєдіяльності системи і її компонентів. Часто функцію визначають як реакцію системи на зовнішній вплив. Але такий підхід справедливий тільки для однофункціональних систем.

У широкому значенні функція – це форма, спосіб прояву активності, життєдіяльності системи та її компонентів.

Функції характерні й системі, й її компонентам, причому функції системи є інтегративний результат утворюючих її компонентів. Формально функція представляється залежністю вихідної характеристики від вхідних сигналів. Для графічного подання систем використовують структурні й функціональні схеми.

Структурна схема – схематичне зображення взаємодії між елементами, компонентами, підсистемами і зовнішнім середовищем. У структурній схемі вказуються всі елементи системи, всі зв'язки між елементами усередині системи і зв'язки певних елементів з навколишнім

середовищем. Часто структурні схеми подають у вигляді графів. Граф складається з позначень елементів, що називаються вершинами, і позначень зв'язків між ними, що називаються ребрами (іноді дугами).

Графи можуть зображувати будь-які структури, якщо не накладати обмежень на пересіченість ребер. Деякі типи структур мають особливості, важливі для практики, вони виділені з інших і отримали спеціальні назви. Так, в організаційних системах часто зустрічаються лінійні, деревоподібні, матричні, мережні структури і структури зі зворотними зв'язками (рис. 18.2).

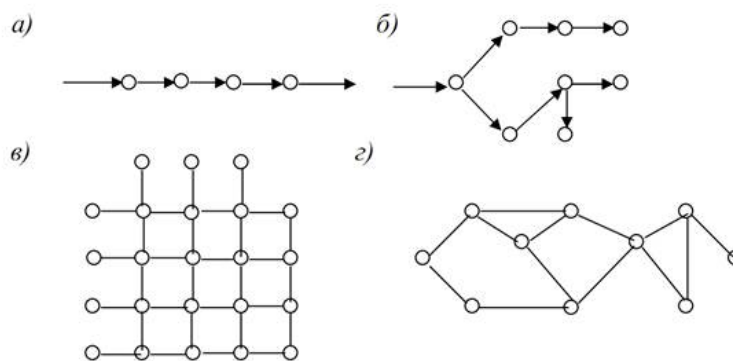


Рис.18.2. Графи різних структур: а) лінійна структура; б) деревоподібна структура; в) матрична структура; г) мережна структура

Функціональна (феноменологічна) схема – графічне представлення функцій системи чи її компонентів без відображення їхнього внутрішнього структурування. Компоненти функціональної схеми не вимагають того, щоб бути цілком подібними компонентам прототипу, тому що метою створення такої схеми є тільки опис функцій прототипу. Кожний з компонентів системи, власне кажучи, є «чорною скринькою».

Поняття **чорної скриньки** образно підкреслює повну відсутність відомостей про її внутрішню будову. Чорна скринька – основа макропідходу до аналізу систем, тобто таких методів вивчення системи, що ґрунтуються на властивостях співвідношення вхід–вихід.

Різні види структур мають специфічні особливості й можуть розглядатися як самостійні поняття теорії систем. Коротко охарактеризуємо основні з них (рис. 18.3).

Одним з способів декомпозиції системи є її представлення в вигляді сітчастої структури або мережі. Наприклад, мережева структура може відображати характер дії технічної системи (телефона мережа, електрична мережа тощо), етапи діяльності людини (при виробництві продукції – графік мережі, при проектуванні – модель мережі, при плануванні – план мережі тощо).

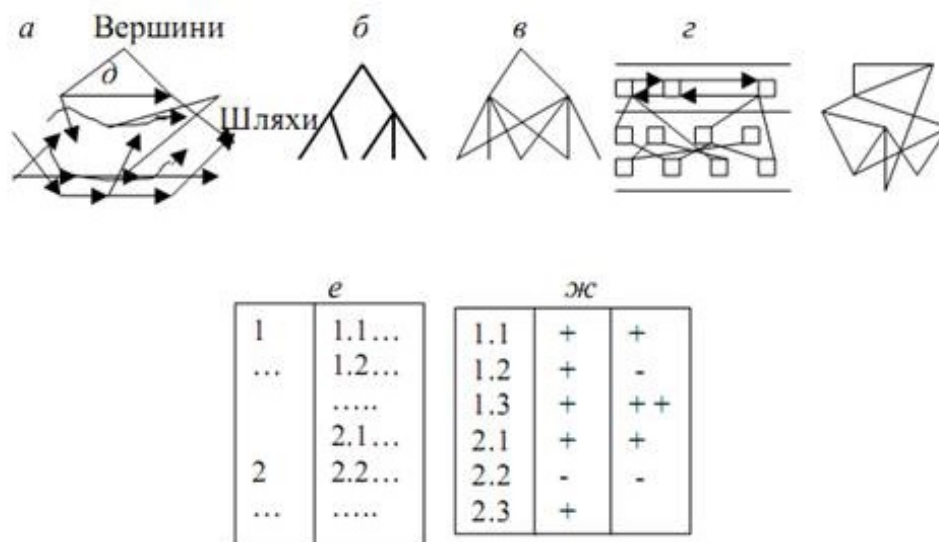


Рис. 18.3. Особливості структур

Завдання розпізнавання мають наступні характерні риси. Це інформаційні завдання, що складаються з двох етапів:

- перетворення вихідних даних до виду, зручному для розпізнавання;
- власне розпізнавання (вказівка приналежності об'єкта певного класу).

У цих завданнях можна вводити поняття аналогії або подібності об'єктів і формулювати правила, на підставі яких об'єкт зараховується в один і той же клас або в різні класи.

У цих завданнях можна оперувати набором прецедентів – прикладів, класифікація яких відома і які у вигляді формалізованих описів можуть бути пред'явлені алгоритмом розпізнавання для настроювання на завдання в процесі навчання.

Для цих завдань важко будувати формальні теорії і застосовувати класичні математичні методи (часто недоступна інформація для точної математичної моделі або виграш від використання моделі та математичних методів непорівнянний з витратами).

Виділяють такі типи завдань розпізнавання:

- 1) Завдання розпізнавання – віднесення пред'явленого об'єкта за його опису до одного з заданих класів (навчання з учителем);
- 2) Завдання автоматичної класифікації – розбиття множини об'єктів, ситуацій, явищ за їх описами на систему непересічних класів (таксономія, кластерний аналіз, самонавчання);
- 3) Завдання вибору інформативного набору ознак при розпізнаванні;
- 4) Завдання приведення вихідних даних до виду, зручному для розпізнавання;

5) Динамічне розпізнавання і динамічна класифікація – завдання 1 і 2 для динамічних об'єктів;

б) Завдання прогнозування – суть попередній тип, в якому рішення повинне ставитися до деякого моменту в майбутньому.

Розпізнавання образів (об'єктів, сигналів, ситуацій, явищ або процесів) – завдання ідентифікації об'єкта або визначення будь-яких його властивостей за його зображенню (оптичне розпізнавання) або аудіозапису (акустичне розпізнавання) та іншим характеристикам.

Подальший розвиток штучного інтелекту, зокрема проектування комп'ютерів п'ятого покоління, здатних до більш безпосередньому спілкуванню з людиною на природних для людей мовах і за допомогою мови, немислимі без розпізнавання. Тут рукою подати і до робототехніки, штучних систем управління, що містять як життєво важливих підсистем системи розпізнавання.

Саме тому до розвитку розпізнавання образів з самого початку була прикута чимало уваги з боку фахівців самого різного профілю – кібернетиків, нейрофізіологів, психологів, математиків, економістів і т.д. Багато в чому саме з цієї причини сучасне розпізнавання образів саме харчується ідеями цих дисциплін.

18.2.4. Загальна характеристика систем телевимірювань

Телевимірювання (ТВ), телеметрія, вимір на відстані, здійснюване засобами *телемеханіки*; розділ телемеханіки, до якого відносяться передача на відстань вимірювальної інформації і представлення її у вигляді, найбільш зручному для безпосереднього сприйняття оператором, введення в машину, що управляє, або автоматичної реєстрації.

Вимірювальна інформація від вимірювальних перетворювачів (датчиків) передається на пункт управління або контролю безперервно або циклічно, а інколи по виклику – після посилки оператором спеціального сигналу–запиту, що містить адресу (кодове позначення) вимірюваного параметра. При передачі безперервна вимірювана величина на контрольованому пункті часто піддається квантуванню (див. Квантування сигналу); на пункті управління вона відтворюється в аналоговій формі (у вигляді свідчень стрілочних приладів) або в цифровій формі. Вимірювальна інформація передається за допомогою систем ТІ, а також за допомогою комбінованої телевимірювання і телесигналізації системи або за допомогою комплексної телемеханічної системи.

Принципи побудови систем телевимірювання

Системи телевимірювання призначені для передачі значень контрольованих параметрів на значні віддалі. Потреба в таких системах спричиняється тим, що при великих відстанях передачі та використанні звичних електричних способів проведення вимірювань значно зростають значення похибок вимірювання за рахунок непостійності параметрів лінії зв'язку. Звичні методи вимірювань принципово непридатні у випадку проведення контролю за параметрами рухомих об'єктів.

Таким чином, головна задача, яку вирішують пристрої телевимірювання, полягає у забезпеченні можливості проведення вимірювань електричних та неелектричних параметрів на значних віддальях з допустимою точністю.

Принцип побудови системи телевимірювання (ТВ) пояснює рис. 18.4. Датчик телевимірювання (ДТ) перетворює контрольовану величину A_1 у відповідний первинний сигнал. Передавач (П) перетворює цей сигнал у допоміжну величину f_1 , яка зручна для передачі лінією зв'язку (ЛЗ). Приймач (Пр) перетворює отриманий сигнал у форму, яка зручна для проведення відліку і приймальний прилад (ПП) відтворює вимірювану величину.

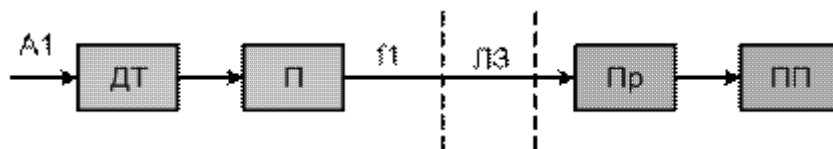


Рис. 18.4. Структурна схема системи телевимірювання

В системі технічної діагностики, автоматичного контролю та розпізнавання образів ІВС входить як підсистема.

18.2.5. Галузі використання інформаційно-вимірювальних систем

До основних сфер використання інформаційних–вимірювальних систем відносяться:

- інженерні системи життєзабезпечення людини (тепло–, газо–, електро– і водопостачання, каналізація, вентиляція і т.п.);
- контроль та керування технологічними процесами;
- контроль та керування рухомими об'єктами;
- моніторинг навколишнього середовища;
- контроль якості продукції;

- випробування та діагностика складної техніки;
- автоматизація наукових досліджень;
- метрологічні випробування засобів вимірювання тощо.

Для прикладу можна привести застосування ІВС у складі промислового робота, що забезпечує сприйняття та оброблення інформації про зовнішнє середовище, в якому функціонує робот, і внутрішньої інформації про стан вузлів, механізмів та систем робота за ДСТУ 2879–94

Запитання для самоконтролю до теми 18

1. Система автоматичного контролю. Функції систем автоконтролю.
2. Склад, структура та види система технічної діагностики.
3. Функціональні та структурні особливості систем розпізнавання образів.
4. Форми існування знань у ІВС. Способи подання даних та знань. Відмінність знань від даних.
5. Традиційні способи представлення та обробки знань в інтелектуальних ІВС системах. Зв'язок (взаємозв'язок одиниць знань).
6. Особливості структурних схем інтелектуальних ІВС
7. Загальна характеристика систем телевимірювань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гуржій А.М., Поворознюк Н.І. Електричні і радіотехнічні вимірювання. – Київ: Навчальна книга, 2002. – 287 с.
2. Державний класифікатор України. Класифікатор системи позначень одиниць вимірювання та обліку ДК 011–96. Наказ Держстандарту України № 8 від 09.01.1997.
3. ДСТУ 2681–94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення.
4. ДСТУ 2879–94 Маніпулятори, автооператори, роботи промислові та системи виробничі гнучкі. Терміни та визначення.
5. Измерения и компьютерно–измерительная техника: Учеб. пособие / В.А. Поджаренко, В.В. Кухарчук. – К.: УМК ВО, 1991. – 240 с.
6. Люшенко В.І. Вимірювання в енергетиці / В.І.Люшенко, А.І.Туяхов,
7. Кремлевский П.П. Измерение расхода многофазных потоков / П.П.Кремлевский. – Л., 1982. –214 с.
8. Лук'янчук Ю.І. «Цифрові вимірювальні прилади». Електронний посібник з дисципліни: «Цифрові вимірювальні прилади» Луцький національний технічний університет. Факультет екології та приладо–енергетичних систем. Кафедра Приладобудування. – 2015.
9. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник/ За ред. _роф.Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво «Бескід Біт», 2003. – 544 с.
10. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2000. – 360 с.
11. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник/Є.С. Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво «Бескід Біт», 2003. – 544 с.
12. Потапов А.С. Распознавание образов и машинное восприятие. – К.: Политехника, 2007. – 548 с
13. Проектирование микропроцесорных измерительных приборов и систем/В.Д. Циделко, Н.В. Нагаец, Ю.В. Хохлов и др.– К.: Техніка, 1984. –215 с.
14. Стухляк П. Д., Іванченко О. В., Букетов А. В., Долгов М. А. Теорія інформації (інформаційно–вимірювальні системи, похибки, ідентифікація): навчальний посібник. – Херсон: Айлант, 2011. – 371 с.

15. Тойберт П. Оценка точности результатов измерений /П.Тойберт. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 88с.
16. Величко О.М., Коломієць Л.В., Гордієнко Т.Б. Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості у пяти томах. Том1. Метрологія Підручник. – Одеса. 2014. – 688с.
17. Величко О.М., Коломієць Л.В., Гордієнко Т.Б. Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості у пяти томах. Том4. Забезпечення якості та системи управління. Підручник. – Одеса –2014.- 508с.