

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

## МЕТРОЛОГІЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

курс лекцій з навчальної дисципліни

Запоріжжя 2025



УДК 006.91(076)  
К93

*Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 8 від 27.06.2025 р.)*

**Укладач**  
Шрамко Ю.Ю. канд. техн. наук

**К93 Курс лекцій з дисципліни «Метрологія та електричні вимірювання» / уклад. Ю. Ю. Шрамко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025. 304 с.**

УДК 006.91(076)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТИНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025

# ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	<b>7</b>
<b>ТЕМА 1. ВСТУП ДО МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ТЕРМІНИ. ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ, СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ (SI)</b> .....	<b>9</b>
1.1 ПОНЯТТЯ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЇЇ ЗНАЧЕННЯ В СУЧАСНІЙ ТЕХНІЦІ ТА НАУЦІ .....	9
1.2. ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ: ВИМІРЮВАННЯ, РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЮВАННЯ, ВИМІРЮВАЛЬНА ВЕЛИЧИНА .....	10
1.3 КЛАСИФІКАЦІЯ ВИДІВ ВИМІРЮВАНЬ .....	10
1.4 ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ТА СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ.....	11
1.5 МІЖНАРОДНА СИСТЕМА ОДИНИЦЬ (SI) ТА ЇЇ ПЕРЕВАГИ .....	11
1.6 ОСНОВНІ ТА ПОХІДНІ ОДИНИЦІ SI, КРАТНІ ТА ЧАСТКОВІ ОДИНИЦІ .....	12
<b>Висновки</b> .....	12
<b>КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО ТЕМИ 1</b> .....	12
<b>ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА ДО ТЕМИ 1</b> .....	13
<b>ТЕМА 2. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ВИМІРЮВАНЬ: ПОХИБКИ, ТОЧНІСТЬ, ВІДТВОРЮВАНІСТЬ. ВИДИ ПОХИБОК, ЇХНІ ПРИЧИНИ ТА СПОСОБИ ОЦІНКИ. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ</b> .....	<b>14</b>
2.1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ВИМІРЮВАНЬ .....	14
2.2. ВИДИ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ТА ЇХ ОЦІНКА.....	15
2.3 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ.....	18
<b>Висновки</b> .....	24
<b>КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО ТЕМИ 2</b> .....	24
<b>ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА ДО ТЕМИ 2</b> .....	25
<b>ТЕМА 3 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ. КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ, ЇХНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b> .....	<b>27</b>
3.1 ВСТУП ДО МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....	27
3.2 СТАНДАРТИЗАЦІЯ В МЕТРОЛОГІЇ .....	31
3.3 СЕРТИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ .....	31
3.4 КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ .....	32
3.5 МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ .....	33
<b>Висновки</b> .....	33
<b>КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО ТЕМИ 3</b> .....	33
<b>ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА ДО ТЕМИ 3</b> .....	35
<b>ТЕМА 4. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ ТА СИЛИ СТРУМУ</b> .....	<b>36</b>
4.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВЕЛИЧИНИ .....	36
4.2 КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН .....	37
4.3 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ .....	37
4.4 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ .....	46
4.5 СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОННІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ .....	49
4.6 ТИПОВІ ПОХИБКИ ПРИ ВИМІРЮВАННІ НАПРУГИ ТА СТРУМУ .....	50
<b>Висновки</b> .....	51
<b>КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО ТЕМИ 4</b> .....	52
<b>ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА ДО ТЕМИ 4</b> .....	52
<b>ТЕМА № 5: ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ: МЕТОДИ І ПРИЛАДИ</b> .....	<b>54</b>
5.1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ .....	54
5.2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ.....	54



5.3 Прилади для вимірювання опору .....	57
5.4 Цифрові мультиметри .....	59
5.5. МЕГАОММЕТРИ.....	59
5.6 Класи точності вимірювальних приладів.....	60
Висновок .....	62
Контрольні запитання до теми 5.....	62
Використана література до теми 5 .....	63
<b>ТЕМА 6 "ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ" .....</b>	<b>64</b>
6.1. Основні поняття потужності та енергії в електричних колах .....	64
6.2 Типи вимірювальних приладів для потужності та енергії .....	64
6.3 МЕТОДИ вимірювання потужності та енергії .....	65
6.4. ФАКТОР потужності та його оптимізація .....	65
6.5 Розрахунок енергії в електричних колах .....	65
Висновки .....	69
Контрольні запитання до теми 6.....	69
Використана література до теми 6 .....	70
<b>ТЕМА 7. ВИМІРЮВАННЯ ІНДУКТИВНОСТІ ТА ЄМНОСТІ: ПРИНЦИПИ І МЕТОДИ .....</b>	<b>72</b>
7.1 Основні поняття.....	72
7.2 МЕТОДИ вимірювання індуктивності та ємності .....	73
7.3 Місткові методи.....	73
7.4 РЕЗОНАНСНІ МЕТОДИ .....	77
7.5 Вимірювання індуктивності .....	79
7.6 ПРИКЛАДИ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ .....	83
Висновки .....	83
Контрольні запитання до теми 7.....	83
Використана література до теми 7 .....	84
<b>ТЕМА 8. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА ФАЗОВОГО ЗСУВУ .....</b>	<b>85</b>
Висновки .....	90
Контрольні запитання до теми 8.....	90
Використана література до теми 8 .....	91
<b>ТЕМА 9. ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ .....</b>	<b>93</b>
9.1 Основні параметри напівпровідникових пристроїв.....	93
9.2 МЕТОДИ вимірювання.....	93
9.3 Обладнання для вимірювання параметрів .....	94
9.4. Особливості вимірювань для різних типів пристроїв .....	94
9.5 ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ТА СТАНДАРТИ вимірювань .....	96
Висновок .....	97
Контрольні запитання до теми 9.....	97
Використана література до теми 9 .....	98
<b>ТЕМА 10. ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНИХ КІЛ. МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ, МАГНІТНА ПРОНИКНІСТЬ .....</b>	<b>99</b>
10.1 Основні параметри магнітних кіл .....	99
10.2 Використання магнітометрів та ферометрів.....	100
10.3 МЕТОДИ вимірювання магнітного потоку та магнітної напруги .....	101
10.4 Принципи вимірювання магнітних параметрів .....	101



Висновки .....	110
Контрольні запитання до теми 10 .....	110
Використана література до теми 10 .....	111
<b>ТЕМА 11. ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ, МЕХАНІЧНИХ ЗУСИЛЬ ТА ПАРАМЕТРІВ РУХУ .....</b>	<b>113</b>
11.1 Вимірювання геометричних розмірів .....	115
11.2 Вимірювання товщини шару покриття .....	119
11.3 Вимірювання рівнів .....	121
11.4 Вимірювання відстаней між об'єктами .....	126
11.5 Вимірювання механічних напружень .....	129
11.6 Вимірювання механічних сил та тиску .....	132
11.7 Вимірювання крутних моментів .....	135
11.8 Вимірювання параметрів лінійного руху .....	138
11.9 Вимірювання параметрів вібрацій .....	140
11.10 Вимірювання параметрів обертового руху .....	144
11.11 Прилади з проскопічними перетворювачами .....	146
Висновки .....	148
Контрольні запитання до теми 11 .....	148
Використана література до теми 11 .....	149
<b>ТЕМА 12. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ .....</b>	<b>151</b>
12.1 Термометри розширення .....	151
12.2 Манометричні термометри .....	153
12.3 Термоелектричні термометри .....	154
12.4 Термопари опору .....	155
12.5 Пірометри .....	156
12.6 Тепловізори .....	161
Висновки .....	164
Контрольні запитання до теми 12 .....	164
Використана література до теми 12 .....	165
<b>ТЕМА 13 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗІВ ТА РІДИНИ .....</b>	<b>167</b>
13.1 Витратоміри змінного перепаду тиску .....	168
13.2 Витратоміри змінного рівня .....	171
13.3 Витратоміри постійного перепаду тиску .....	172
13.4 Електромагнітні (індукційні) витратоміри .....	174
13.5 Ультразвукові витратоміри .....	177
13.6 Швидкісні лічильники рідини .....	180
13.7 Прилади для вимірювання об'єму речовини .....	184
13.8 Ваговий метод вимірювання витрати сипучих речовин .....	187
Висновки .....	192
Контрольні запитання до теми 13 .....	192
Використана література до теми 13 .....	193
<b>ТЕМА 14. АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ .....</b>	<b>195</b>
14.1. Структурна схема цифрового вимірювального приладу. Дискретизація у часі та квантування за рівнем .....	195
14.2 Аналого-цифрове перетворення .....	198



14.3. Цифро-аналогове перетворення.....	205
14.4 Кодування інформації. Види кодів цифрових приладів та систем .....	208
Висновки .....	211
Контрольні запитання до теми 14 .....	211
Використана література до теми 14 .....	212
<b>ТЕМА 15. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ: ПРИНЦИПИ РОБОТИ І ОСНОВИ</b>	
<b>ПРОЄКТУВАННЯ. ВИМІРЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....</b>	<b>214</b>
15.1 Цифрові вимірювальні прилади, загальні положення.....	214
15.2 Цифровий частотомір середніх значень .....	218
15.3 Цифровий фазометр миттєвих значень .....	220
15.4 Цифровий вольтметр часового-імпульсного перетворення.....	220
15.6 Вимірювання якості електричної енергії .....	226
15.7 Осцилографи .....	239
15.8 Віртуальні вимірювальні прилади.....	243
Висновки .....	245
Контрольні запитання до теми 15 .....	245
Використана література до теми 15 .....	246
<b>ТЕМА 16. ОСНОВИ КАЛІБРУВАННЯ, ПОВІРКИ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ</b>	<b>248</b>
16.1 Калібрування засобів вимірювальної техніки та устаткування .....	248
16.2 Мета і види метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки .....	249
16.3 Методи метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки .....	252
16.4 Метрологічна повірка приладів прямого перетворення.....	255
Висновки .....	256
Контрольні запитання до теми 16 .....	257
Використана література до теми 16 .....	258
<b>ТЕМА 17. МЕТРОЛОГІЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИМІРЮВАНЬ.</b>	
<b>ВИМІРЮВАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, ДАТЧИКИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧІ. ДАТЧИКИ ТА</b>	
<b>ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН .....</b>	<b>260</b>
17.1 Вимірювальні перетворювачі на електричних величин.....	260
17.2 Автоматизація вимірювального процесу .....	276
17.3 Метрологічне забезпечення ІВС .....	288
Висновки .....	301
Контрольні запитання до теми 17 .....	302
Використана література до теми 17 .....	303



## ВСТУП

Вивчення курсу лекцій «**Метрологія та електричні вимірювання**» є фундаментальним елементом технічної освіти в галузі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. У сучасних умовах розвитку науково-технічного прогресу, автоматизації виробництва та зростаючих вимог до точності, достовірності та надійності технічних процесів, питання вимірювання набувають першочергового значення. Саме тому ця навчальна дисципліна займає провідне місце у підготовці майбутніх інженерів.

Курс лекцій охоплює широкий спектр теоретичних і прикладних аспектів метрології – науки про вимірювання, включаючи основні поняття, класифікацію, принципи вимірювальної техніки, методи обробки результатів, а також сучасні підходи до аналізу похибок і забезпечення точності. Особлива увага приділяється вивченню електричних вимірювань – напруги, сили струму, опору, потужності, енергії, частоти, фазового зсуву тощо – як одного з найважливіших напрямів технічного контролю у виробничих і енергетичних системах.

У курсі також розглянуто методи стандартизації, калібрування, метрологічної повірки, а також застосування цифрових вимірювальних приладів і датчиків у системах автоматизованого контролю. Вивчення дисципліни сприяє формуванню у студентів професійних компетентностей у сфері забезпечення якості, надійності та ефективності технічних вимірювань у промисловості, наукових дослідженнях та енергетичних системах.

Лекційний матеріал побудований за принципами системного підходу і містить конкретні приклади практичного застосування метрологічних методів у різних галузях. Це дозволяє студентам не лише засвоїти теоретичні основи, але й розвивати аналітичне мислення, необхідне для самостійного розв'язання інженерних задач.

Отримані знання та практичні навички стануть основою для подальшого професійного розвитку студентів, підготовки кваліфікаційних робіт і реалізації проектів у галузі електротехніки, енергетики.

Опанування змісту курсу забезпечує такі результати навчання:

1. Знати і розуміти теоретичні основи метрології та електричних вимірювань, принципи роботи пристроїв автоматичного керування, релейного захисту та автоматики, мати навички здійснення відповідних вимірювань і використання зазначених пристроїв для вирішення професійних завдань.
2. Здійснювати аналіз процесів в електроенергетичному, електротехнічному та електромеханічному обладнанні, відповідних комплексах і системах
3. Уміти оцінювати енергоефективність та надійність роботи електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних систем.
4. Знати вимоги нормативних актів, що стосуються інженерної діяльності, захисту інтелектуальної власності, охорони праці, техніки безпеки та виробничої санітарії, враховувати їх при прийнятті рішень.

5. Розв'язувати складні спеціалізовані задачі з проектування і технічного обслуговування електромеханічних систем, електроустаткування електричних станцій, підстанцій, систем та мереж

Таблиця 1 - Таблиця відповідності результатів вивчення дисципліни компетентностям

Компетентності	РН
<p>1. здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p>2. здатність вирішувати практичні задачі із залученням методів математики, фізики та електротехніки.</p> <p>3. здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з проблемами метрології, електричних вимірювань, роботою пристроїв автоматичного керування, релейного захисту та автоматики.</p> <p>4. усвідомлення необхідності підвищення ефективності електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного устаткування.</p> <p>5. усвідомлення необхідності постійно розширювати власні знання про нові технології в електроенергетиці, електротехніці та електромеханіці.</p>	<p>1. Знати і розуміти теоретичні основи метрології та електричних вимірювань, принципи роботи пристроїв автоматичного керування, релейного захисту та автоматики, мати навички здійснення відповідних вимірювань і використання зазначених пристроїв для вирішення професійних завдань.</p> <p>2. Здійснювати аналіз процесів в електроенергетичному, електротехнічному та електромеханічному обладнанні, відповідних комплексах і системах.</p> <p>3. Уміти оцінювати енергоефективність та надійність роботи електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних систем.</p> <p>Знати вимоги нормативних актів, що стосуються інженерної діяльності, захисту інтелектуальної власності, охорони праці, техніки безпеки та виробничої санітарії, враховувати їх при прийнятті рішень.</p> <p>4. Розв'язувати складні спеціалізовані задачі з проектування і технічного обслуговування електромеханічних систем, електроустаткування електричних станцій, підстанцій, систем та мереж</p>



## ТЕМА. 1. ВСТУП ДО МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ТЕРМІНИ. ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ, СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ (SI)

Визначення та значення метрології у техніці та науці. Основні поняття: точність, похибка, надійність, калібрування. Система міжнародних одиниць (SI): структура та використання. Одиниці вимірювання електричних і неелектричних величин. Перехідні та похідні одиниці в системі SI. Національні та міжнародні метрологічні інститути і їх роль. Висновки.

### 1.1 Поняття метрології та її значення в сучасній техніці та науці

**Метрологія** — це наука про вимірювання, яка охоплює не тільки теорію, але і практику забезпечення точності, достовірності та повторюваності вимірювань. Метрологія тісно пов'язана з якістю продукції, дослідженнями і технологічними процесами.

У сучасній метрології можна виділити три основні напрями:

1. **Наукова метрологія** — займається розробкою нових методів вимірювань і створенням еталонів для фундаментальних одиниць. Наприклад, у науковій метрології визначається точне значення фізичних констант, таких як швидкість світла або планкова константа.

2. **Прикладна метрологія** — забезпечує точні вимірювання для конкретних галузей, таких як електроніка, біологія, медицина та інші, де точність вимірювань безпосередньо впливає на результат досліджень і якість продукції.

3. **Законодавча метрологія** — регулює вимоги до вимірювальної техніки та методів вимірювання, наприклад, стандартизацію, сертифікацію, періодичну перевірку вимірювального обладнання. Вона забезпечує, що вимірювання, які проводяться на законодавчому рівні (медичні, екологічні тощо), відповідають встановленим нормам.

Значення метрології включає:

- **Підвищення якості продукції** — точні вимірювання дозволяють контролювати якість на кожному етапі виробництва.
- **Підтримка наукових досліджень** — дослідження в різних галузях потребують точних вимірювань, щоб гарантувати відтворюваність і об'єктивність результатів.
- **Забезпечення безпеки та надійності** — наприклад, вимірювання параметрів конструкцій, щоб підтвердити їх надійність і безпеку.
- **Сприяння міжнародній торгівлі** — використання єдиних одиниць і стандартів дозволяє спростити обмін товарами, послугами та інформацією на міжнародному рівні.

## 1.2. Основні визначення: вимірювання, результат вимірювання, вимірювальна величина

Для розуміння метрології важливо знати основні визначення, які є базовими у цій науці:

- **Вимірювання** — це процес визначення значення фізичної величини за допомогою спеціальних технічних засобів. Наприклад, вимірювання температури за допомогою термометра є процесом визначення числового значення температури об'єкта.
- **Результат вимірювання** — це числове значення фізичної величини, отримане в процесі вимірювання, яке порівнюється з відповідною одиницею. Наприклад, результат вимірювання температури може бути 25 °С.
- **Вимірювана величина** — фізична характеристика об'єкта, яку можна кількісно визначити, наприклад, довжина, маса, час, температура, напруга тощо.
- **Одиниця вимірювання** — це величина, прийнята за стандарт, з якою порівнюється вимірювана величина.
- **Еталон** — пристрій або об'єкт, який служить стандартом для визначення одиниці вимірювання і використовується для калібрування вимірювальних приладів. Наприклад, еталон метра визначає довжину, що дорівнює одному метру.
- **Похибка вимірювання** — різниця між виміряним значенням величини і справжнім значенням. Вона може бути позитивною або негативною і залежить від точності приладу, умов вимірювання та інших факторів. Наприклад, якщо температура тіла вимірюється з похибкою  $\pm 0,1$  °С, це означає, що виміряне значення може відрізнятись на 0,1 °С в обидва боки.

## 1.3 Класифікація видів вимірювань

Класифікація вимірювань допомагає вибрати оптимальні методи для конкретних завдань. Основні критерії класифікації:

### За призначенням вимірювань

- **Контрольні вимірювання** використовуються для перевірки якості продукції чи процесів.
- **Дослідницькі вимірювання** застосовуються в наукових дослідженнях для отримання нових знань.
- **Технологічні вимірювання** потрібні для контролю параметрів технологічних процесів.

### За характером вимірюваних величин

- **Дискретні вимірювання** мають чітко визначені значення, наприклад, кількість об'єктів (цілі числа).
- **Неперервні вимірювання** можуть набувати будь-якого значення в певному інтервалі, як-от температура, маса, час.

### За методом вимірювання

- **Безпосередні вимірювання** здійснюються без додаткових обчислень (наприклад, вимірювання довжини лінійкою).
- **Опосередковані вимірювання** використовують обчислення, де вимірюється непрямий параметр (наприклад, маса визначається через об'єм і густину).

### За ступенем точності

- **Абсолютні вимірювання** здійснюються з максимально можливою точністю.
- **Відносні вимірювання** дають значення з певною похибкою, що може бути прийнятною в конкретних умовах.

## 1.4 Одиниці вимірювання та системи одиниць

**Одиниці вимірювання** — це стандартизовані величини, що використовуються для порівняння. У різних країнах історично використовувалися різні одиниці, що ускладнювало наукові й торгові зв'язки. Існують такі системи одиниць:

- **Система MKS** — метр, кілограм, секунда, яка широко використовується у фізиці.
- **Система CGS** — сантиметр, грам, секунда, часто використовується в науках про матеріали.
- **Система FPS** — фут, фунт, секунда, яка раніше використовувалася в Англії та США.

Найбільш універсальною та загальноприйнятною є **Міжнародна система одиниць (SI)**, яка включає сім основних одиниць і має переваги завдяки своїй точності та уніфікованості.


## 1.5 Міжнародна система одиниць (SI) та її переваги

**Міжнародна система одиниць (SI)** була прийнята для забезпечення єдиної мови вимірювань у світі. Основні переваги SI:

- **Єдність і універсальність** — використання єдиної системи забезпечує легкість у спілкуванні та обміні даними між різними країнами та науковими установами.
- **Простота у використанні** — всі одиниці SI пов'язані між собою, що робить розрахунки зручними.
- **Точність** — одиниці визначаються через фундаментальні фізичні константи, що дозволяє забезпечувати стабільність значень.
- **Гнучкість** — система включає основні, похідні, кратні і часткові одиниці, що дозволяє вимірювати як дуже малі, так і дуже великі величини.

Основні одиниці SI:

1. **Довжина** — метр (м), визначається через швидкість світла.
2. **Маса** — кілограм (кг), базується на планковій константі.

- 
3. **Час** — секунда (с), визначена через випромінювання цезію-133.
  4. **Електричний струм** — ампер (А), визначається через електричний заряд.
  5. **Температура** — кельвін (К), базується на визначенні абсолютного нуля.
  6. **Кількість речовини** — моль (моль), визначає кількість частинок.
  7. **Світність** — кандела (кд), визначає інтенсивність світла.

## 1.6 Основні та похідні одиниці SI, кратні та часткові одиниці

**Основні одиниці SI** визначаються на основі природних констант. Кожна з них має чітке визначення і є основою для утворення інших одиниць.

**Похідні одиниці SI** утворюються з основних одиниць, наприклад:

- Ньютон (Н) — одиниця сили, що визначається як  $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$ .
- Джоуль (Дж) — одиниця енергії, що дорівнює  $\text{Н}\cdot\text{м}$ .
- Вольт (В) — одиниця напруги, що визначається як  $\text{Дж}/\text{Кл}$ .

**Кратні та часткові одиниці** застосовуються для зручності роботи з великими та малими величинами, використовуючи префікси:

- **Кратні одиниці:** кіло- (к,  $10^3$ ), мега- (М,  $10^6$ ), гіга- (Г,  $10^9$ ).
- **Часткові одиниці:** мілі- (м,  $10^{-3}$ ), мікро- ( $\mu$ ,  $10^{-6}$ ), нано- (н,  $10^{-9}$ ).

Ця гнучкість системи SI робить її найпоширенішою і дозволяє застосовувати одну і ту ж систему для різних галузей знань і практики.

### Висновки

- Метрологія є основою точності вимірювань у науці і техніці.
- Одиниці вимірювання SI забезпечують універсальність і точність.
- Система SI включає основні, похідні, кратні і часткові одиниці, що охоплюють практично всі можливі вимірювання.

### Контрольні запитання до теми 1


1. Що таке метрологія, і чому вона важлива у сучасній науці та техніці?
2. Які три основні напрями метрології ви знаєте? Дайте короткий опис кожного з них.
3. Яка різниця між вимірювальною величиною та результатом вимірювання?
4. Що таке еталон, і яка його роль у вимірюваннях?
5. Що називають похибкою вимірювання, і які види похибок існують?
6. Чим відрізняються дискретні та неперервні вимірювання? Наведіть приклади кожного виду.



7. Що таке опосередковане вимірювання? Чим воно відрізняється від безпосереднього?
8. Які ви знаєте системи одиниць вимірювання? Чому система SI є найбільш поширеною?
9. Які переваги має Міжнародна система одиниць (SI) порівняно з іншими системами?
10. Назвіть сім основних одиниць SI і відповідні фізичні величини.
11. Як визначаються основні одиниці SI, такі як метр, кілограм і секунда?
12. Що таке похідні одиниці? Наведіть приклади похідних одиниць у системі SI.
13. Яка мета використання кратних і часткових одиниць? Наведіть приклади префіксів SI.
14. Як ви розумієте поняття відносної похибки? Як її обчислити?
15. Чому важливо забезпечувати точність вимірювань, особливо у виробництві та наукових дослідженнях?

### **Використана література до теми 1**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
3. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Житомир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
4. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.
5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
6. Токар Ю. С., Караван Ю. В. Основи стандартизації, метрології та сертифікації: посібник. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. 247 с.



## ТЕМА 2. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ВИМІРЮВАНЬ: ПОХИБКИ, ТОЧНІСТЬ, ВІДТВОРЮВАНІСТЬ. ВИДИ ПОХИБОК, ЇХНІ ПРИЧИНИ ТА СПОСОБИ ОЦІНКИ. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Основні параметри вимірювальних систем: точність, чутливість, відтворюваність. Види похибок: систематичні, випадкові, грубі. Причини виникнення похибок у вимірюваннях. Методи оцінки похибок і вплив факторів на їх зменшення. Обробка результатів вимірювань: середнє значення, стандартне відхилення. Використання довірчих інтервалів для оцінки точності вимірювань. Висновки.

### Вступ до теорії вимірювань

Теорія вимірювань – це фундаментальна дисципліна, що вивчає методи і принципи отримання кількісних оцінок фізичних величин. Розвиток вимірювальних методик та інструментів дозволяє точно визначати значення параметрів об'єктів і процесів, що має ключове значення для наукових досліджень, технологій та інженерії. Вимірювання завжди супроводжується певними неточностями, тому важливо розуміти природу похибок, їхні види та способи обробки результатів.

Теорія вимірювань – це розділ науки, який вивчає процес отримання числових значень фізичних величин за допомогою вимірювальних інструментів і методів. Основна мета теорії вимірювань полягає в тому, щоб забезпечити максимально точні та надійні результати, які можна використовувати для оцінки параметрів об'єктів, процесів або явищ.

### 2.1 Основні поняття теорії вимірювань

1. **Фізична величина** – це характеристика об'єкта або явища, яка може бути кількісно визначена. Наприклад, температура, маса, об'єм, довжина.

2. **Вимірювання** – це процес отримання значення фізичної величини шляхом порівняння з еталоном або за допомогою спеціальних методів та інструментів.

3. **Результат вимірювання** – це значення вимірюваної величини, отримане за допомогою вимірювального процесу. Результат може бути представлений як одне значення або набір значень у випадку багаторазових вимірювань.

### 2. Похибки вимірювань

Похибка вимірювання – це відхилення результату вимірювання від істинного значення величини. Вона може бути обумовлена як особливостями вимірювального інструмента, так і зовнішніми умовами. Жодне вимірювання не є абсолютно точним, і будь-який результат вимірювання містить похибки. Похибки можуть мати різне походження та проявлятися в різний спосіб.



Похибки вимірювань поділяються на кілька видів:

1. **Систематичні похибки** – це похибки, які повторюються у вимірюваннях і мають певний напрямок. Вони можуть бути пов'язані з недосконалістю приладів, методологією вимірювання або зовнішніми умовами.

2. **Випадкові похибки** – це похибки, що мають випадковий характер і виникають внаслідок флуктуацій у вимірювальному процесі. Їх можна зменшити шляхом багаторазових вимірювань і усереднення результатів.

3. **Грубі похибки** – значні відхилення від правильного значення, які можуть бути викликані помилками оператора або несправностями обладнання. Такі похибки зазвичай виявляють та виключають із розгляду.

#### **Точність і відтворюваність**

- **Точність** — це ступінь наближення результату вимірювання до істинного значення. (це здатність вимірювального процесу дати значення, близьке до істинного. Чим меншою є похибка, тим вищою є точність.)

- **Відтворюваність** — це здатність вимірювальної системи давати однакові результати при багаторазовому проведенні вимірювань в однакових умовах. Відтворюваність забезпечує сталість результатів і є важливим критерієм якості вимірювань.

Точність вимірювання характеризує надійність результату, тоді як відтворюваність вказує на сталість результатів при повторних вимірюваннях.

## **2.2. Види похибок вимірювань та їх оцінка**

Вимірювальні похибки класифікуються за різними критеріями:

### **Систематичні похибки**

Ці похибки мають постійний або змінний характер і впливають на результат у певному напрямку. Причини систематичних похибок включають:

- **Похибки засобів вимірювань** (наприклад, неправильне налаштування приладу).


- **Методичні похибки** (помилки методики вимірювання, наприклад, спрощення в розрахунках).

- **Зовнішні фактори** (температура, вологість, магнітні поля тощо).

*Способи оцінки:* систематичні похибки можна оцінити шляхом проведення контрольних вимірювань із використанням еталонних зразків або порівняння результатів з іншими методами.

### **Випадкові похибки**

Ці похибки не мають постійної величини чи напрямку, і вони виникають внаслідок випадкових впливів (наприклад, флуктуації зовнішніх умов). Вони підкоряються статистичним законам і розглядаються як частина нормального розподілу похибок.



*Способи оцінки:* для зменшення впливу випадкових похибок проводять багаторазові вимірювання, після чого обчислюють середнє значення та середнє квадратичне відхилення.

### **Грубі похибки**

Грубі похибки виникають через значні відхилення в результатах вимірювання через випадкові помилки або несправності обладнання. Вони можуть бути наслідком людського фактору, технічних проблем тощо.

*Способи оцінки:* для виявлення грубих похибок застосовують статистичні критерії (наприклад, критерій Граббса), а також аналізують вимірювання на наявність аномальних значень.

## **Основні статистичні критерії для виявлення грубих похибок**

### **Критерій Граббса**

Критерій Граббса використовується для виявлення одиничного аномального значення в наборі даних. Основна ідея полягає в тому, щоб перевірити, чи є найбільше або найменше значення в наборі значень статистично значущим відхиленням.

Формула для розрахунку критерію Граббса виглядає наступним чином:

$$G = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\sigma}$$

де  $X_i$  — підозріле значення,  
 $\bar{X}$  — середнє значення вибірки,  
 $\sigma$  — стандартне відхилення вибірки.

Отримане значення  $G$  порівнюють із критичним значенням для заданого рівня значущості та кількості вимірювань. Якщо  $G$  перевищує критичне значення, то дане значення можна вважати грубою похибкою та виключити з розгляду.

### **Критерій Романовського**

Критерій Романовського часто застосовують при невеликих вибірках, особливо коли потрібно виявити декілька аномальних значень. Він ґрунтується на порівнянні відхилення підозрілого значення від середнього значення з середнім квадратичним відхиленням вибірки.

Формула для розрахунку критерію Романовського:

$$R = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\sigma}$$

Критичне значення  $R$  визначається для відповідного рівня значущості та розміру вибірки. Якщо значення  $R$  перевищує критичне значення, тоді можна припустити, що  $X_i$  є грубою похибкою.

## Критерій Стьюдента (t-критерій)

Критерій Стьюдента використовують для перевірки, чи належить певне значення до вибірки або є аномальним. Він часто використовується для перевірки середнього значення невеликих вибірок і може застосовуватися для виявлення грубих похибок у вимірюваннях.

Формула для критерію Стьюдента:

$$t = \frac{X_i - \bar{X}}{S/\sqrt{n}}$$

де  $S$  — стандартне відхилення,  
 $n$  — кількість вимірювань.

Результат порівнюється з критичним значенням  $t$  для заданого рівня значущості. Якщо  $t$  перевищує це значення, то можна вважати, що  $X_i$  є грубою похибкою.

### Метод трьох сигм

Метод трьох сигм застосовується для оцінки грубих похибок у вибірках, що підпорядковуються нормальному розподілу. Якщо значення відрізняється від середнього більш ніж на три середньоквадратичних відхилення, то його можна вважати грубою похибкою.

Формально:

$$|X_i - \bar{X}| > 3$$

Якщо ця умова виконується для певного значення  $X_i$ , його відкидають як грубу похибку.

### Як застосовувати статистичні критерії на практиці?

1. **Розрахувати середнє значення** ( $\bar{X}$ ) і стандартне відхилення ( $\sigma$ ) всіх вимірювань. Це буде базовим етапом для більшості критеріїв.
2. **Обчислити критерій для кожного значення.** Залежно від обраного критерію, проводиться розрахунок відповідного показника ( $G$ ,  $R$ ,  $t$  або відхилення в сигмах).
3. **Порівняти отримане значення із критичним.** Якщо розраховане значення перевищує критичне для даного рівня значущості, це вказує на те, що значення можна вважати грубою похибкою.
4. **Прийняти рішення про виключення значень.** Виявлені аномальні значення за допомогою критеріїв можуть бути відкинуті, щоб забезпечити точніший результат вимірювання.

### Абсолютна похибка

Абсолютною похибкою вимірювання називається різниця між виміряними значеннями та істинним значенням величини. Вона виражається в тих самих одиницях, що й сама вимірювана величина:



$$\Delta X = X_{\text{вим}} - X_{\text{іст}}$$

### **Відносна похибка**

Відносна похибка вимірювання визначається як відношення абсолютної похибки до істинного значення величини і виражається у відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{\text{іст}}} \times 100 \%$$

### **Середня квадратична похибка**

Середня квадратична похибка використовується для характеристики випадкових похибок. Вона обчислюється за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

де  $X_i$  – окремі вимірювання,  $\bar{X}$  – середнє значення,  $n$  – кількість вимірювань.

## **2.3 Обробка результатів вимірювань**

Для отримання коректних даних у вимірювальній практиці застосовують різні методи обробки результатів вимірювань:

### **Усереднення**

При багаторазових вимірюваннях одного параметра обчислюють середнє значення. Це дозволяє зменшити вплив випадкових похибок і наблизити результат до істинного значення.


Усереднення є одним із найбільш ефективних способів зменшення впливу випадкових похибок у результатах вимірювань. Це метод, який передбачає обчислення середнього значення результатів декількох вимірювань однієї і тієї ж величини. Основною ідеєю цього підходу є те, що випадкові похибки розподіляються симетрично навколо істинного значення, тому середнє значення буде наближатися до істинного значення, особливо коли кількість вимірювань є значною.

### **Середнє арифметичне значення**

Середнє арифметичне значення розраховується за формулою:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

де  $\bar{X}$  — середнє значення,  
 $X_i$  — результати окремих вимірювань,  
 $n$  — кількість вимірювань.



Це середнє значення дозволяє отримати узагальнену оцiнку вимiряної величини та зменшує вплив випадкових похибок на остаточний результат.

### **Вплив випадкових похибок при усередненнi**

Випадковi похибки можуть бути як позитивними, так i негативними. Якщо випадковi похибки розподiляються нормальнo, то пiд час усереднення додатнi i вiд'ємнi вiдхилення частково компенсують одне одного, i середнє значення наближається до iстинного.

Крiм того, при збiльшеннi кiлькостi вимiрювань точнiсть результату пiдвищується, оскiльки стандартне вiдхилення середнього значення зменшується пропорцiйно до кореня квадратного iз кiлькостi вимiрювань:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

де  $\sigma_{\bar{x}}$  — середнє квадратичне вiдхилення середнього значення,  
 $\sigma$  — середнє квадратичне вiдхилення окремих вимiрювань.

### **Приклади використання усереднення**

**Приклад 1:** При вимiрюваннi температури у лабораторiї отримано 5 результатiв: 20,1°C, 20,3°C, 19,8°C, 20,0°C i 20,2°C. Середнє арифметичне значення:

$$\bar{X} = \frac{20,1 + 20,3 + 19,8 + 20,0 + 20,2}{5} = 20,08^\circ\text{C}$$

Це значення є наближеним до iстинного, оскiльки вплив випадкових вiдхилень було зменшено шляхом усереднення.

**Приклад 2:** Пiд час вимiрювання довжини об'єкта одержано такi результати: 10,05 см, 10,07 см, 10,04 см, 10,06 см i 10,08 см. Середнє значення:

$$\bar{X} = \frac{10,05 + 10,07 + 10,04 + 10,06 + 10,08}{5} = 10,06 \text{ см}$$

### **Переваги методу усереднення**

1. **Зниження випадкових похибок:** Збiльшуючи кiлькiсть вимiрювань, можна мiнiмiзувати вплив випадкових похибок. Це особливо корисно, коли важко контролювати зовнiшнi умови або коли сам процес вимiрювання має флуктуацiї.

2. **Пiдвищення точностi:** За рахунок зменшення стандартного вiдхилення середнього значення зростає точнiсть вимiрювань, що особливо важливо у точних науках та технологiях.

3. **Наближення до істинного значення:** При достатній кількості вимірювань середнє значення наближається до істинного значення, що дозволяє використовувати його як найбільш обґрунтоване наближення.

4. **Легкість застосування:** Обчислення середнього арифметичного є простим і не вимагає складних розрахунків, що робить його доступним у широкому колі застосувань.

#### 5. Недоліки методу усереднення

- **Не усунення систематичних похибок:** Усереднення ефективно лише для зменшення випадкових похибок. Якщо у вимірюваннях присутня систематична похибка, вона залишиться в середньому значенні.

- **Залежність від кількості вимірювань:** Чим більша кількість вимірювань, тим точніше середнє значення, проте це може вимагати більше ресурсів і часу.

### Метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів застосовується для мінімізації похибок під час побудови емпіричних залежностей. Він дозволяє звести до мінімуму суму квадратів відхилень виміряних значень від математичної моделі.

#### 1. Основні принципи методу найменших квадратів

Метод найменших квадратів мінімізує суму квадратів відхилень вимірюваних значень від теоретичної кривої. Це дозволяє зменшити вплив випадкових похибок і отримати найбільш наближений результат.

Нехай є набір точок  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , , що характеризують залежність між двома змінними  $x$  та  $y$ . Завдання методу найменших квадратів полягає в тому, щоб знайти параметри моделі, що мінімізують суму квадратів відхилень між виміряними значеннями  $y_i$  та  $\widehat{y}$  обчисленими значеннями за моделлю.

#### 2. Пряма лінія методом найменших квадратів

Найпростіший випадок методу найменших квадратів — це лінійна регресія, тобто побудова прямої залежності між  $x$  та  $y$ :

$$y = a + bx$$

де  $a$  — коефіцієнт перетину з віссю  $y$ ,  
 $b$  — коефіцієнт нахилу.

Для знаходження коефіцієнтів  $a$  та  $b$  метод найменших квадратів мінімізує наступну функцію помилки:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bx_i))^2$$

де  $S$  — сума квадратів відхилень між фактичними значеннями  $y_i$  та значеннями  $(a + bx_i)$ , обчисленими за лінійною моделлю.

### Формули для обчислення коефіцієнтів

Коефіцієнти  $a$  та  $b$  для лінії, що найкраще описує дані, розраховуються за формулами:

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$
$$a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n}$$

Ці формули обчислюють значення  $a$  та  $b$ , що мінімізують суму квадратів відхилень між обчисленими та фактичними значеннями, забезпечуючи найбільш точну пряму залежність для набору точок.

### Загальна процедура методу найменших квадратів

- **Збір даних:** Збираються значення змінних  $x$  та  $y$ , що необхідні для аналізу.
- **Вибір моделі:** Вибирається математична модель (пряма, парабола, експоненціальна функція тощо), яка найкраще описує залежність між змінними. Лінійна модель є найпростішим варіантом, але метод найменших квадратів також можна застосувати до нелінійних моделей.
- **Розрахунок коефіцієнтів:** Використовуючи дані, обчислюються параметри моделі (наприклад,  $a$  та  $b$  для прямої), які мінімізують суму квадратів відхилень.
- **Аналіз точності моделі:** Визначається, наскільки точно обрана модель описує залежність між змінними. Для цього часто використовують коефіцієнт детермінації  $R^2$ , який показує, яка частка варіації змінної  $y$  пояснюється моделлю.

### Приклад застосування методу найменших квадратів для лінійної регресії

Припустимо, є наступні дані:

$x$	$y$
1	2.3
2	2.9
3	3.7
4	4.2
5	5.1

1. Обчислюємо середні значення  $\bar{x}$  та  $\bar{y}$ .
2. Розраховуємо коефіцієнти  $a$  і  $b$  за формулами вище.
3. Отримуємо рівняння прямої  $y = a + bx$ .

### **Переваги методу найменших квадратів**

- Простота: Лінійна регресія є простою у виконанні та інтерпретації.
- Мінімізація похибок: Метод забезпечує мінімальну суму квадратів відхилень.
- Універсальність: Метод можна застосовувати для нелінійних моделей.

### **Обмеження методу найменших квадратів**

- Чутливість до аномальних значень: Грубі похибки можуть вплинути на результати.
- Лінійність: Метод краще працює для лінійних залежностей.

**Висновок.** Метод найменших квадратів є ефективним інструментом для побудови моделі залежності між змінними на основі емпіричних даних. Він дозволяє отримати найкращу лінію або іншу функцію, яка описує зв'язок між змінними, мінімізуючи вплив випадкових похибок.

### **Виключення грубих похибок**

При наявності значно відхилених результатів (грубих похибок) проводиться їх аналіз і виключення з обчислень для підвищення надійності середніх значень.

### **Статистичні методи**

Статистичний аналіз результатів вимірювань дозволяє обчислити ймовірність отримання певних результатів і визначити, чи є отримані дані достовірними.

Статистичні методи відіграють ключову роль в аналізі результатів вимірювань, оскільки вони дозволяють оцінити достовірність та точність отриманих даних. За допомогою статистичних підходів можна визначити ймовірність того, що отримані результати відображають реальний стан об'єкта або явища, а також оцінити, наскільки значні відхилення між різними вимірюваннями.

### **Оцінка достовірності результатів**


Достовірність результатів вимірювання показує, наскільки результати відповідають реальним значенням досліджуваної величини. Для цього використовуються наступні статистичні підходи:

- **Середнє значення і стандартне відхилення:** Дозволяють обчислити основні характеристики вибірки та оцінити її варіативність.
- **Коефіцієнт варіації:** Відношення стандартного відхилення до середнього значення, виражене у відсотках. Він дозволяє порівнювати результати з різних вибірок, навіть якщо середні значення суттєво відрізняються.

### **Статистичні критерії для оцінки надійності даних**

#### **Довірчий інтервал**

Довірчий інтервал є діапазоном значень, у межах якого знаходиться істинне значення з певною ймовірністю (наприклад, 95%). Він розраховується за формулою:


$$\text{Довірчий інтервал} = \bar{X} \pm t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

де  $\bar{X}$  — середнє значення,  
 $t$  — критичне значення для обраного рівня ймовірності,  
 $\sigma$  — стандартне відхилення,  
 $n$  — кількість вимірювань.

Довірчий інтервал дозволяє визначити точність середнього значення і є важливим інструментом для прийняття рішень на основі вимірювальних даних.

### **Критерій Стьюдента (t-тест)**

T-критерій застосовується для порівняння середніх значень двох вибірок, щоб визначити, чи є різниця між ними статистично значущою. Це важливо для визначення, чи є різниця між вибірками результатом випадкових відхилень, чи вона має реальні підстави.

T-критерій обчислюється за формулою:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S \cdot \sqrt{\frac{2}{n}}}$$

де  $\bar{X}_1$  і  $\bar{X}_2$  — середні значення вибірок,  $S$  — середнє стандартне відхилення вибірок.

### **Аналіз варіацій (ANOVA)**

Аналіз варіацій застосовується для оцінки статистичної значущості відмінностей між трьома і більше вибірками. Це дозволяє визначити, чи відрізняються середні значення вибірок одна від одної більше, ніж можна очікувати від випадкових відхилень.

### **Кореляційний аналіз**

Кореляція визначає, наскільки тісно пов'язані дві змінні. Коефіцієнт кореляції показує силу зв'язку між ними: значення, близьке до +1 або -1, свідчить про сильну залежність, тоді як значення, близьке до 0, вказує на відсутність кореляції.

### **Методи виявлення аномальних значень**

Для виявлення та виключення аномальних (грубих) похибок, які можуть спотворювати загальний результат, використовують спеціальні статистичні критерії:

- **Критерій Граббса та критерій Романовського:** Використовуються для перевірки одиничних або кількох підозрілих значень у вибірці. Вони допомагають відсіювати дані, що значно відрізняються від середнього значення, підвищуючи достовірність результатів.

### **Практичне застосування статистичних методів**

Статистичні методи дозволяють приймати обґрунтовані рішення на основі оброблених вимірювань. Наприклад, довірчі інтервали допомагають оцінити, наскільки точні результати, а t-тест і ANOVA дають змогу перевірити гіпотези щодо значущості відмінностей між різними наборами даних.

**Висновок.** Статистичний аналіз є невід'ємною частиною обробки вимірювальних даних, оскільки він дозволяє визначити надійність та достовірність результатів. Застосування статистичних критеріїв забезпечує якісний аналіз та підвищує точність вимірювань, роблячи висновки на основі результатів більш обґрунтованими.

### Приклади розрахунків похибок

#### Приклад 1: Абсолютна та відносна похибка

Припустимо, що при вимірюванні довжини об'єкта отримано значення 10,2 см, а його еталонне значення – 10 см. Абсолютна похибка:

$$\Delta X = 10,2 - 10 = 0,2 \text{ см}$$

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{0,2}{10} \times 100 \% = 2 \%$$

#### Приклад 2: Середнє квадратичне відхилення

При вимірюванні однієї і тієї ж величини були отримані такі результати: 10,1 см, 10,2 см, 10,0 см, 10,3 см, 10,1 см. Середнє значення:

$$\bar{X} = \frac{10,1 + 10,2 + 10,0 + 10,3 + 10,1}{5} = 10,14 \text{ см}$$

Середня квадратична похибка:


$$\sigma = \sqrt{\frac{(10,1 - 10,14)^2 + (10,2 - 10,14)^2 + (10,0 - 10,14)^2 + (10,3 - 10,14)^2 + (10,1 - 10,14)^2}{5}}$$

### Висновки

Теорія вимірювань є основою точних наук та інженерних дисциплін, дозволяючи отримувати якісні результати з урахуванням похибок. Розуміння природи похибок і методів їх оцінки є ключовим для забезпечення точності та надійності вимірювань. Навички роботи з вимірювальними похибками допомагають правильно обробляти результати і приймати обґрунтовані рішення.

### Контрольні запитання до теми 2

1. Що таке теорія вимірювань, і яку роль вона відіграє у науці та інженерії?
2. Яка основна мета теорії вимірювань?
3. Поясніть різницю між фізичною величиною та результатом вимірювання.
4. Що таке фізична величина? Наведіть приклади.

- 
5. Як визначається результат вимірювання і в яких формах він може бути представлений?
  6. Що таке похибка вимірювання?
  7. Назвіть та коротко охарактеризуйте основні види похибок вимірювань.
  8. Що таке систематична похибка і які її основні причини?
  9. Як можна зменшити вплив випадкових похибок?
  10. Як визначається точність вимірювання?
  11. Що таке відтворюваність і чому вона важлива у вимірюваннях?
  12. Які фактори впливають на точність і відтворюваність вимірювального процесу?
  13. Які причини виникнення систематичних похибок?
  14. Що таке середнє квадратичне відхилення, і як воно використовується при оцінці похибок?
  15. Наведіть приклад розрахунку відносної похибки.
  16. Як усереднення допомагає зменшити вплив випадкових похибок?
  17. Яка формула використовується для обчислення середнього арифметичного значення?
  18. Як впливають додаткові вимірювання на точність середнього значення?
  19. Які основні статистичні критерії використовуються для виявлення грубих похибок?
  20. Що таке критерій Граббса і як він застосовується для аналізу вимірювань?
  21. Опишіть процедуру застосування критерію Романовського.
  22. Що таке довірчий інтервал і як його використовують у вимірюваннях?
  23. Яка мета t-критерію (критерію Стьюдента) в аналізі вимірювань?
  24. Як аналіз варіацій (ANOVA) допомагає визначити значущість відмінностей між вибірками?
  25. Наведіть приклад обчислення абсолютної та відносної похибки для вимірювань.
  26. Які основні висновки можна зробити щодо значення теорії вимірювань для точних наук та інженерії?

### **Використана література до теми 2**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.



3. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Житомир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
4. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.
5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
6. Токар Ю. С., Караван Ю. В. Основи стандартизації, метрології та сертифікації: посібник. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. 247 с.



## ТЕМА 3 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ. КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ, ЇХНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Метрологічне забезпечення виробництва: завдання та методи. Стандартизація в метрології: національні та міжнародні стандарти. Процедура сертифікації засобів вимірювальної техніки. Класифікація вимірювальних приладів за метрологічними характеристиками. Огляд класів точності приладів і їх застосування. Вимоги до вимірювальної техніки в різних галузях. Висновки.

### 3.1 Вступ до метрологічного забезпечення

**Метрологічне забезпечення** — це сукупність методів, норм і засобів, спрямованих на забезпечення єдності та достовірності вимірювань. Метрологічне забезпечення відіграє критичну роль у всіх галузях економіки, науки, техніки та виробництва, оскільки дозволяє точно вимірювати фізичні величини та контролювати якість продукції.

Основні завдання метрологічного забезпечення:

- Забезпечення єдності вимірювань (тобто відповідність результатів вимірювання стандартам і нормам).
- Підвищення точності вимірювань.
- Забезпечення надійності вимірювальної техніки.

**Основні аспекти забезпечення єдності вимірювань:**

**Стандартизація вимірювальних методів і засобів:**

- Встановлення єдиних вимог до методів вимірювання та вимірювальних приладів.
- Розробка стандартів на міжнародному, національному та галузевому рівнях, які забезпечують однаковість вимірювань.

**Використання еталонів та еталонної апаратури:**


- Для забезпечення єдності вимірювань використовуються державні та міжнародні еталони — взірцеві прилади та стандарти, що задають точні значення фізичних величин.
- Еталони дозволяють встановлювати стандарти вимірювань та служать для передачі розмірності фізичних величин засобам вимірювальної техніки.

**Метрологічний контроль і нагляд:**

- Метрологічний нагляд здійснюється з метою контролю якості вимірювань на всіх етапах виробництва, експлуатації та наукових досліджень.
- Завдяки метрологічному контролю вимірювальні засоби регулярно перевіряються на відповідність стандартам.

**Важливість забезпечення єдності вимірювань:**

- **Точність і достовірність:** Єдність вимірювань гарантує, що вимірювальні результати є точними та можуть бути верифіковані.



- **Зменшення помилок:** Систематична перевірка і калібрування знижують ймовірність помилок та похибок у вимірюваннях.

- **Міжнародна співпраця:** Єдність вимірювань полегшує обмін науковими і технічними результатами, створює передумови для співпраці між країнами та забезпечує відповідність міжнародним стандартам.

**Підвищення точності вимірювань** — це один із ключових напрямків метрологічного забезпечення, який спрямований на зменшення похибок і підвищення достовірності результатів вимірювання. Висока точність є важливою для різних галузей, оскільки дозволяє отримувати більш точні й надійні дані, що, у свою чергу, впливає на якість продукції, безпеку та ефективність виробничих і наукових процесів.

#### **Способи підвищення точності вимірювань**

##### **Застосування високоточних засобів вимірювальної техніки:**

- Використання сучасних приладів із високою роздільною здатністю та низьким рівнем внутрішніх похибок.
- Вибір приладів з відповідним класом точності для конкретного завдання, щоб мінімізувати похибки.

##### **Калібрування та регулярна повірка приладів:**

- Проведення регулярного калібрування дозволяє перевіряти відповідність приладу еталонним значенням і забезпечувати точність вимірювань.
- Повірка дає змогу усунути можливі похибки, що виникають у процесі експлуатації, і забезпечує відповідність стандартам точності.

##### **Зменшення впливу зовнішніх факторів:**

- Вимірювальні процеси можуть зазнавати впливу температури, вологості, вібрації, магнітних та електричних полів.
- Захист вимірювального обладнання від зовнішніх впливів, використання стабілізованих умов вимірювання та екранування допомагають знизити похибки.

##### **Оптимізація методів вимірювання:**

- Використання найбільш ефективних методик для конкретних вимірювальних задач (наприклад, методики зі зменшенням випадкових похибок або методи, що підвищують чутливість).
- Вибір оптимальної техніки проведення вимірювань, яка забезпечує точніші результати (наприклад, застосування цифрових методів обробки сигналів для покращення точності результатів).

##### **Використання автоматизованих систем вимірювання:**

- Автоматизація вимірювальних процесів дозволяє зменшити вплив людського фактору, який може бути джерелом похибок.
- Сучасні автоматизовані системи вимірювання забезпечують високу стабільність і точність, оскільки в них використовується програмне забезпечення для обробки і контролю даних.

## **Підготовка і кваліфікація персоналу:**

- Фахівці повинні мати необхідну кваліфікацію, щоб правильно користуватися вимірювальними приладами, розуміти принципи їхньої роботи та можливі джерела похибок.
- Постійне підвищення кваліфікації персоналу знижує ймовірність помилок, пов'язаних з некоректним використанням приладів.

## **Чинники, що впливають на точність вимірювань**

- **Систематичні похибки:** похибки, що виникають через особливості засобу вимірювання або умов проведення вимірювань (наприклад, калібрування, виробничі дефекти).
- **Випадкові похибки:** похибки, що виникають під впливом непередбачуваних факторів (наприклад, коливання умов вимірювання, людський фактор).
- **Методичні похибки:** похибки, що виникають через неправильний вибір або застосування методики вимірювання.

## **Важливість підвищення точності вимірювань**

- **Поліпшення якості продукції:** точні вимірювання дозволяють контролювати якість продукції на всіх етапах виробництва, що забезпечує відповідність продукції стандартам.
- **Забезпечення безпеки:** у багатьох галузях (наприклад, в авіації, будівництві, медицині) точність вимірювань безпосередньо впливає на безпеку.
- **Підвищення ефективності виробничих процесів:** точні вимірювання дозволяють краще контролювати процеси і використовувати ресурси з меншою похибкою, що знижує витрати.
- **Покращення наукових досліджень:** точність вимірювань у дослідженнях забезпечує достовірність наукових даних і полегшує порівняння результатів між різними дослідницькими групами та країнами.

**Забезпечення надійності вимірювальної техніки** — це комплекс заходів, спрямованих на підтримку працездатності та стабільності характеристик вимірювальних приладів у різних умовах експлуатації. Надійність вимірювальної техніки є важливою для забезпечення точності вимірювань протягом тривалого часу, особливо в критичних галузях, де від стабільності роботи приладів залежить безпека, якість продукції та ефективність процесів.

**Основні аспекти забезпечення надійності вимірювальної техніки:**

### **Конструкційна надійність:**

- Розробка приладів з урахуванням факторів навколишнього середовища, таких як вологість, температура, вібрація та корозійні впливи.
- Використання якісних матеріалів та комплектуючих, які мають високі характеристики довговічності та зносостійкості.
- Резервування критичних компонентів, що дозволяє уникнути збоїв у разі виходу з ладу окремих частин.

### **Технічне обслуговування та ремонт:**

- Регулярне технічне обслуговування (перевірка, чищення, заміна зношених деталей) дозволяє підтримувати працездатність приладів та запобігати можливим збоєм.
- Вчасний ремонт і усунення несправностей дозволяють значно продовжити термін експлуатації техніки та зменшити ризик несподіваних відмов.

### **Випробування на надійність:**

- Проведення лабораторних і натурних випробувань приладів у різних умовах, які імітують реальні умови експлуатації.
- Випробування на вплив різних факторів (вологість, тиск, температурні перепади) дозволяють оцінити, як прилади витримують навантаження і чи зберігають свої характеристики.
- Тести на зносостійкість та витривалість компонентів допомагають передбачити термін служби приладів і виявити слабкі місця конструкції.

### **Автоматизація моніторингу працездатності:**

- Використання автоматизованих систем для контролю параметрів приладів у режимі реального часу (наприклад, моніторинг температури, рівня зносу, зміни характеристик).
- Автоматизований моніторинг дозволяє виявляти відхилення та потенційні проблеми на ранніх етапах, що знижує ризик несправностей.

### **Забезпечення захисту від зовнішніх впливів:**

- Захист вимірювальної техніки від впливу пилу, вологи, електромагнітного випромінювання та інших шкідливих факторів.
- Спеціальні корпуси, герметизація, використання матеріалів з високими захисними властивостями дозволяють запобігти пошкодженням і зберігати функціональність приладів навіть в екстремальних умовах.

### **Чинники, що впливають на надійність вимірювальної техніки:**

- **Якість виробництва та комплектуючих:** застосування якісних матеріалів і відповідальне виготовлення зменшують імовірність відмови.
- **Умови експлуатації:** прилади, що працюють у суворих умовах (високі або низькі температури, вологість, агресивні середовища), мають вищий ризик виходу з ладу.
- **Частота і інтенсивність використання:** інтенсивне використання техніки може призвести до швидкого зношування компонентів, що впливає на загальну надійність.
- **Застосування правил і регламентів обслуговування:** своєчасне обслуговування значно підвищує довговічність і надійність приладів.

### **Важливість забезпечення надійності вимірювальної техніки**

- **Підвищення безпеки:** Надійна техніка зменшує ймовірність аварій і збоїв, що особливо важливо в галузях з підвищеним ризиком (медичина, енергетика, транспорт).

- **Зниження витрат на обслуговування та ремонт:** надійна техніка потребує менше витрат на ремонт і заміну, що економить ресурси підприємства.
- **Забезпечення точності вимірювань:** надійні прилади забезпечують сталість метрологічних характеристик і дають можливість отримувати точні результати без потреби у частих калібруваннях.
- **Довговічність і економічна ефективність:** висока надійність збільшує термін служби приладів, що дозволяє підприємствам знизити витрати на придбання нової техніки.

### 3.2 Стандартизація в метрології

**Стандартизація** — це процес встановлення та впровадження норм, правил і вимог, що стосуються вимірювань, засобів вимірювальної техніки, методики калібрування і перевірки. Стандартизація є важливою частиною метрологічного забезпечення, оскільки вона дозволяє уніфікувати методи та процедури, які використовуються в різних галузях.

#### Основні принципи стандартизації:

- **Єдність норм і вимог:** стандарти повинні бути застосовні у різних галузях і країнах.
- **Відкритість і доступність:** стандарти повинні бути доступні для всіх користувачів, що забезпечує прозорість процесу.
- **Актуальність і відповідність науково-технічному рівню:** стандарти мають оновлюватися в міру розвитку науки та техніки.

#### Основні рівні стандартів:

- **Міжнародні стандарти (ISO, IEC)** — застосовуються у всьому світі та забезпечують уніфікацію на міжнародному рівні.
- **Національні стандарти (ДСТУ в Україні)** — створюються для внутрішнього використання в конкретній країні.
- **Галузеві стандарти** — встановлюються для певних галузей або компаній.

#### Роль стандартизації:

Стандартизація забезпечує єдність вимірювань, сумісність засобів вимірювальної техніки та надійність результатів вимірювань. Вона також сприяє підвищенню ефективності виробництва та якості продукції, дозволяючи знижувати ризики помилок у вимірюванні.

### 3.3 Сертифікація засобів вимірювальної техніки

**Сертифікація** — це процес офіційного підтвердження відповідності засобів вимірювальної техніки встановленим вимогам стандартів. Сертифікація гарантує, що технічні засоби є точними, надійними та безпечними для використання в конкретних умовах.

### **Види сертифікації:**

- **Обов'язкова сертифікація** — стосується засобів, які безпосередньо впливають на безпеку людини та оточення.
- **Добровільна сертифікація** — проводиться на запит виробника чи замовника, щоб підтвердити додаткові характеристики засобу вимірювання.

### **Етапи сертифікації:**

- Подача заявки від виробника чи постачальника засобу вимірювальної техніки.
- Проведення технічних випробувань для визначення точності, надійності та відповідності стандартам.
- Видача сертифіката відповідності у разі успішного проходження всіх випробувань.

Сертифікація є важливим елементом для забезпечення єдності вимірювань і підвищення довіри до вимірювальних приладів. Вона також дозволяє користувачам мати впевненість у якості та точності вимірювальної техніки, що використовується.

## **3.4 Класифікація засобів вимірювальної техніки**

Засоби вимірювальної техніки класифікуються за різними критеріями залежно від їх призначення, типу вимірювань та сфери використання.

### **Класифікація за призначенням:**

- **Засоби первинних вимірювань** — використовуються для прямого вимірювання фізичних величин.
- **Засоби вторинних вимірювань** — використовуються для перетворення, передачі або реєстрації сигналів.

### **Класифікація за типом вимірюваних величин:**

- **Електричні засоби вимірювань** (вольтметри, амперметри).
- **Механічні засоби вимірювань** (штангенциркулі, мікрометри).
- **Оптичні засоби вимірювань** (спектрофотометри).
- **Теплові засоби вимірювань** (термометри).

### **Класифікація за точністю:**

- **Класи точності:** Вони відображають допустимі похибки приладів. Існують високоточні прилади (з мінімальними похибками) та звичайні прилади для загальних потреб.

### **Класифікація за умовами використання:**

- **Промислові** — прилади, які використовуються у виробництві.
- **Лабораторні** — високоточні засоби, що використовуються у наукових дослідженнях.

Також варто зазначити, що засоби вимірювальної техніки можуть мати спеціалізовані типи для використання в екстремальних умовах, таких як високі температури, тиск або вібрації.

### 3.5 Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки

**Метрологічні характеристики** — це сукупність параметрів, які визначають точність, надійність і стабільність засобів вимірювальної техніки. Розглянемо ключові характеристики:

#### **Основні метрологічні характеристики:**

- **Точність** — ступінь відповідності результату вимірювання істинному значенню.
- **Похибка** — різниця між вимірним значенням і дійсним значенням. Вона буває систематичною та випадковою.
- **Відтворюваність** — здатність приладу забезпечувати однакові результати при повторних вимірюваннях за однакових умов.
- **Стабільність** — здатність приладу зберігати свої метрологічні характеристики у часі.
- **Чутливість** — мінімальна зміна вимірюваної величини, яку здатен зафіксувати прилад.

#### **Додаткові метрологічні характеристики:**

- **Діапазон вимірювань** — область, у якій прилад може виконувати вимірювання.
- **Швидкість реакції** — час, необхідний приладу для фіксації вимірюваної величини після її зміни.
- **Надійність** — здатність приладу функціонувати без збоїв протягом заданого часу.

Ці характеристики є основою для вибору та експлуатації засобів вимірювальної техніки в різних умовах. Вони визначають, чи придатний прилад для конкретних завдань, наскільки точні результати він може забезпечити і як довго зберігатиме свої властивості.

#### **Висновки**

Метрологічне забезпечення, стандартизація та сертифікація є невід'ємними елементами будь-якої системи вимірювань. Вони гарантують, що всі вимірювальні прилади відповідають установленим нормам, забезпечують точність та надійність результатів. Класифікація та розуміння метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки дозволяють вибрати оптимальні прилади для конкретних вимірювальних завдань, що є особливо важливим для розвитку сучасної науки і техніки.

#### **Контрольні запитання до теми 3**

1. Що таке метрологічне забезпечення і чому воно є важливим?
2. Які основні завдання метрологічного забезпечення у сучасній промисловості та наукових дослідженнях?
3. Які галузі найбільше залежать від точності метрологічного забезпечення?
4. Дайте визначення стандартизації та її ролі в метрології.



5. Які основні принципи стандартизації? Наведіть приклади їхнього застосування.
6. Які існують рівні стандартів? Поясніть різницю між міжнародними, національними та галузевими стандартами.
7. Які приклади міжнародних стандартів для метрології ви знаєте?
8. Як стандартизація впливає на сумісність та точність вимірювань у різних країнах?
9. Що таке сертифікація і для чого вона потрібна?
10. Чим відрізняється обов'язкова сертифікація від добровільної?
11. Які основні етапи процесу сертифікації засобів вимірювальної техніки?
12. Наведіть приклади засобів вимірювальної техніки, що потребують обов'язкової сертифікації.
13. На які групи можна класифікувати засоби вимірювальної техніки за їхнім призначенням?
14. Які види засобів вимірювальної техніки розрізняють за типом вимірюваних величин?
15. Що означає клас точності засобу вимірювальної техніки і чому він важливий?
16. Наведіть приклади засобів вимірювальної техніки для лабораторного та промислового застосування.
17. Чим відрізняються первинні засоби вимірювань від вторинних?
18. Що таке точність вимірювань, і як вона визначається?
19. Які бувають види похибок? Як вони впливають на результати вимірювань?
20. Що таке відтворюваність, і чому вона є важливою для метрології?
21. Як визначається стабільність засобу вимірювальної техніки?
22. Що таке чутливість засобу вимірювальної техніки? Наведіть приклади.
23. Поясніть значення діапазону вимірювань приладу.
24. Як швидкість реакції засобу вимірювання може впливати на результат вимірювання?
25. Чому надійність приладу є важливою характеристикою в метрології?
26. Чому важливо враховувати метрологічні характеристики при виборі засобу вимірювальної техніки для конкретного завдання?
27. Як стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення взаємопов'язані?
28. Які ризики можуть виникнути при використанні несертифікованих засобів вимірювальної техніки?
29. Як ви вважаєте, які заходи можуть допомогти підвищити точність і надійність вимірювань?



### **Використана література до теми 3**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
3. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Житомир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
4. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
5. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, метрологія та управління якістю: навчальний посібник / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.
6. Янчук І. В., Галунка О. Д., Сумарюк О. В. Метрологія і стандартизація: конспект лекцій / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2021. 103 с.
7. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
8. Токар Ю. С., Караван Ю. В. Основи стандартизації, метрології та сертифікації: посібник. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. 247 с.



## ТЕМА 4. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ ТА СИЛИ СТРУМУ

Принципи вимірювання електричної напруги. Види вольтметрів: аналогові та цифрові. Принципи вимірювання сили струму. Види амперметрів та мультиметрів. Вибір вимірювального приладу для конкретного діапазону напруги і струму. Внутрішній опір приладів і його вплив на точність вимірювань. Висновки.

Вимірювання електричних величин, зокрема напруги та струму, є основою багатьох електротехнічних та електронних досліджень. Від точності таких вимірювань залежить якість роботи електронних систем та безпека електричних пристроїв.

Точність вимірювань є критичною для:

- забезпечення надійної роботи електричних і електронних пристроїв,
- досягнення ефективності в енергетичних системах,
- безпеки експлуатації обладнання.

Визначення електричної напруги та сили струму дозволяє зрозуміти, як електрична енергія передається та перетворюється в системах, а також контролювати якість передачі енергії і взаємодію між різними компонентами електричного кола.

### 4.1. Основні поняття та величини

Пояснення основних понять електричної напруги та сили струму, їх фізичного сенсу. Напруга характеризує потенційну різницю між двома точками і вимірюється у вольтах (В), тоді як сила струму визначає кількість заряду, що проходить через провідник, вимірюється в амперах (А). Закон Ома, який визначає зв'язок між цими величинами ( $U = IR$ ), є фундаментальним для розуміння електричних вимірювань.

#### Електрична напруга ( $U$ )

Електрична напруга — це різниця потенціалів між двома точками електричного поля. Напруга вимірюється у вольтах (В) і характеризує здатність електричного поля виконувати роботу при переміщенні заряду. Формула для визначення напруги:

$$U = IR$$

де  $U$  — напруга в вольтах,  
 $I$  — сила струму в амперах,  
 $R$  — опір в омах.

## Сила струму (I)

Сила струму — це кількість електричних зарядів, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу. Одиниця вимірювання сили струму — ампер (А). Сила струму залежить від напруги та опору в ланцюзі. Закон Ома визначає цей зв'язок і є основою для розуміння багатьох електричних вимірювань.

### 4.2 Класифікація методів вимірювання електричних величин

Існують різні методи вимірювання напруги та струму, які можна розділити на:

- **Прямі методи** — вимірювання відбувається за допомогою приладу, що безпосередньо показує значення величини, наприклад, вольтметри та амперметри.
  - **Приклади:** Вольтметри, амперметри, омметри.
  - **Переваги:** Простота і зручність використання.
- **Непрямі методи** — значення обчислюється на основі інших вимірних величин, наприклад, через вимірювання потужності та опору.
  - **Принцип:** Величина розраховується на основі вимірювання інших параметрів.
  - **Приклад:** Розрахунок сили струму через опір і напругу ( $I = \frac{U}{R}$ ).
  - **Застосування:** Використовується у випадках, коли пряме вимірювання складне або неможливе.
- **Статичними методами** — використовуються для вимірювання постійних величин.
- **Динамічними методами** — використовуються для змінних величин.

### 4.3 Методи вимірювання електричної напруги

Огляд різних типів вольтметрів, принцип їх роботи та застосування. Особлива увага приділяється аналоговим і цифровим вольтметрам: аналогові засновані на відхиленні стрілки, цифрові забезпечують більш точне вимірювання завдяки дисплею. Також обговорюються методи вимірювання високих і низьких напруг та фактори, що впливають на точність вимірювання.


Основним приладом для вимірювання електричної напруги є **вольтметр**.

#### Вольтметр

**Принцип дії:** Вольтметр підключається паралельно до електричного кола, і його внутрішній опір повинен бути високим, щоб звести до мінімуму вплив на коло.

Основні типи та принципи роботи вольтметрів:

**Аналогові вольтметри** засновані на механічному відхиленні стрілки внаслідок взаємодії магнітного поля та струму.

**Вольтметр магнітоелектричної системи**  : Цей тип вольтметра використовує рухому котушку в постійному магнітному полі для вимірювання постійної напруги.

Основний принцип роботи базується на дії постійного магнітного поля на рухому рамку з провідником, по якій протікає струм. Вимірювана напруга подається на цей провідник, що знаходиться в магнітному полі постійного магніту, і викликає його відхилення. Ця система є дуже точною і надійною для вимірювань постійної напруги, але не підходить для змінного струму без додаткових схем випрямлення.

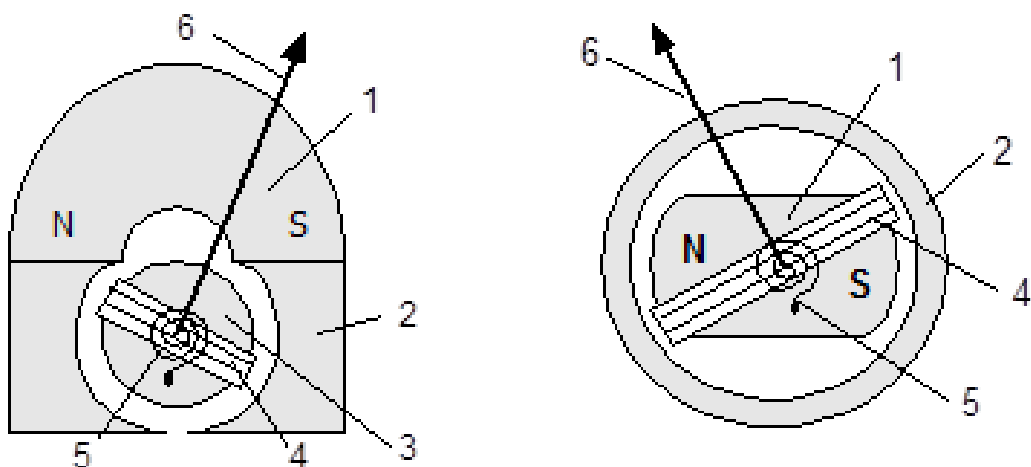


Рисунок 4.1 - Будова магнітоелектричного механізму

Складається з постійного магніту 1, полюсних наконечників 2 і розміщеного всередині сердечника 3 в повітряному зазорі між ними існує радіальне магнітне поле з постійним значенням магнітної індукції  $B$ . Між наконечниками і сердечником розміщується рухома рамка 4 (котушка з намотаним тонким провідником), що може вільно повертатися навколо сердечника і переміщувати стрілку 6 відносно шкали. Спиральні пружини 5 створюють протидіючий момент і втримують стрілку в нульовому положенні.

**Основні характеристики:**

- Висока точність вимірювань.
- Використання постійного магнітного поля.
- Застосування здебільшого для вимірювання постійної напруги.

**Складові частини:**

- Постійний магніт, який створює магнітне поле.
- Рамка з провідника, яка може вільно рухатися у полі постійного магніту.
- Пружини, що забезпечують повернення рамки у вихідне положення після вимірювання.

### Переваги:

- Висока точність та стабільність показів.
- Можливість вимірювання низьких рівнів напруги.

### Недоліки:

- Неможливість використання для вимірювання змінної напруги без випрямлювального елемента.

**Вольтметр електродинамічної системи**  : Використовує взаємодію магнітних полів двох котушок для вимірювання як постійної, так і змінної напруги.

Принцип роботи базується на взаємодії магнітних полів, створюваних двома котушками: нерухомою і рухомою. Коли через ці котушки проходить струм, утворюється магнітне поле, що змушує рухому котушку відхилитися, переміщуючи стрілку на шкалі. Цей механізм дозволяє вимірювати напругу незалежно від її частоти.

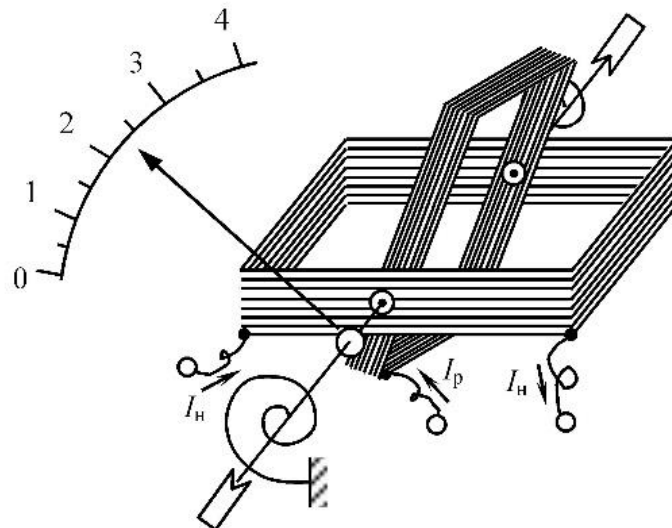


Рисунок 4.2 - Принцип дії приладу електродинамічної системи

Вимірювальний механізм складається з двох котушок: нерухомої і рухомої, розташованої всередині нерухомої котушки. Рухома котушка розташована на одній осі зі стрілкою, крилом повітряного заспокоювача і двома спіральними пружинами. При проходженні струму  $I_n$  по нерухомій котушці і струму  $I_p$  по рухомій котушці між ними виникає сила взаємодії; при цьому на рухому котушку діє пара сил, що викликає її поворот. За постійного струму момент сил і кут повороту рухомої котушки є пропорційними добутку струмів у котушках. У вольтметрах обидві котушки завжди вмикаються послідовно

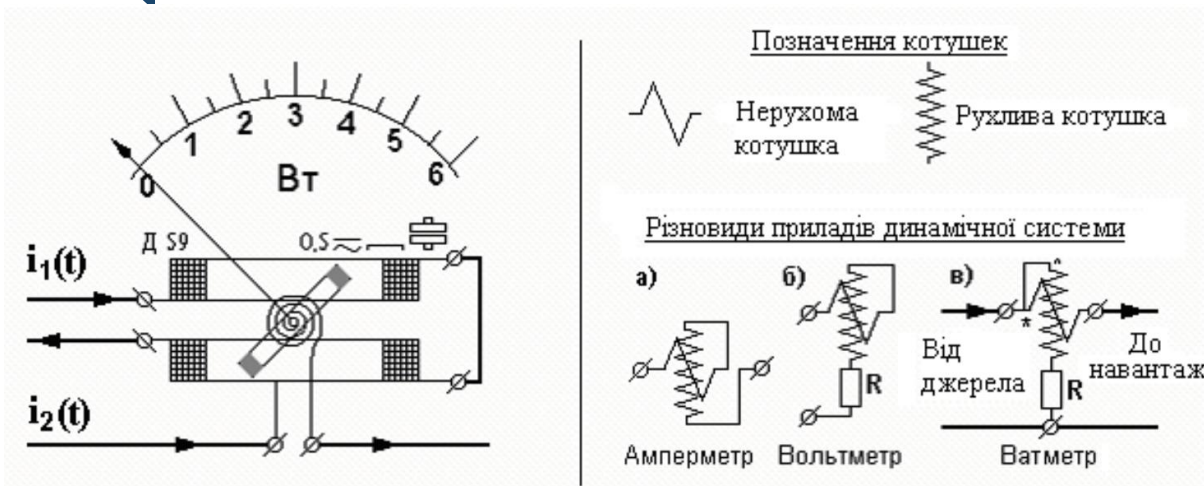


Рисунок 4.3 - Прилади електродинамічної системи. Принцип дії, позначення, варіанти застосування

### Основні характеристики:

- Підходить для вимірювання як постійної, так і змінної напруги.
- Вимірює ефективне значення змінної напруги.

### Складові частини:

- Нерухома котушка, яка створює магнітне поле при проходженні струму.
- Рухома котушка, яка відхиляється під дією магнітного поля.
- Пружина для повернення рухомої котушки у вихідне положення.
- Стрілка, що показує значення напруги на шкалі.


### Переваги:

- Можливість роботи як з постійною, так і зі змінною напругою.
- Надійність та висока точність.

### Недоліки:

- Більш складна конструкція в порівнянні з магнітоелектричними вольтметрами.
- Відносно більші габарити та вартість.

Електродинамічні вольтметри часто застосовуються у високотехнологічних лабораторіях та промислових умовах, де необхідна висока точність вимірювань.

**Вольтметр феродинамічної системи**  : Застосовує магнітний сердечник для підвищення чутливості при вимірюванні змінної напруги.

Він заснований на принципі електромагнітної індукції та використовує магнітний сердечник для посилення магнітного поля, що дозволяє досягти більшої чутливості приладу. Конструкція подібна до електродинамічної системи, але відрізняється тим, що всередині котушок знаходиться

феромагнітний сердечник. Для посилення магнітного поля обмотку нерухої котушки розташовують на сталевому осердді, а рухома котушка обертається навколо нерухомого циліндричного осердя (як у приладі магнітоелектричної системи). При такому виконанні прилади захищені від впливу зовнішніх магнітних полів.

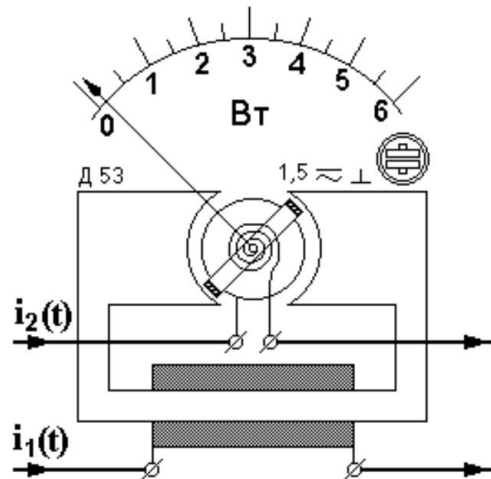


Рисунок 4.4 - Принцип дії приладу феродинамічної системи

#### Основні характеристики:

- Призначений для вимірювання змінної напруги.
- Висока чутливість завдяки використанню феромагнітного матеріалу в конструкції.

#### Складові частини:

- Нерухома та рухома котушки, через які протікає вимірюваний струм.
- Феромагнітний сердечник, який підсилює магнітне поле і забезпечує більшу чутливість.
- Пружина для стабілізації положення рухої котушки.
- Стрілка, що показує результат на шкалі.

#### Переваги:

- Висока чутливість завдяки феромагнітному сердечнику.
- Можливість вимірювання змінної напруги з високою точністю.

#### Недоліки:

- Придатний тільки для змінної напруги.
- Складна конструкція та висока вартість.

Феродинамічні вольтметри використовуються в ситуаціях, де необхідне точне вимірювання змінної напруги, часто в промислових і наукових додатках.


**Вольтметр електромагнітної системи**  : Використовує рухоме залізне осердя в магнітному полі для вимірювання змінної напруги.



Рисунок 4.5 - Приклад зовнішнього виду вольтметр електромагнітної системи

Конструкція досить проста: коли через котушку протікає змінний струм, створюється змінне магнітне поле, яке притягує рухоме залізне осердя. Ступінь цього притягання визначає відхилення стрілки на шкалі, що дозволяє зчитати значення напруги.

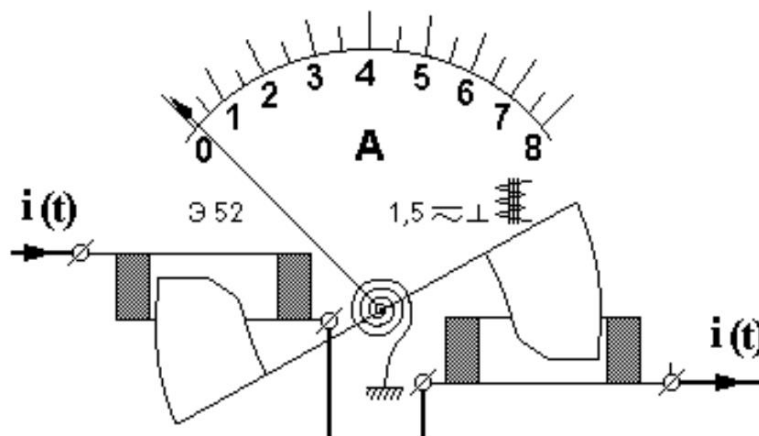


Рисунок 4.6 - Принцип дії приладу електромагнітної системи

**Основні характеристики:**

- Призначений для вимірювання змінної напруги.
- Простий та надійний у використанні.

**Складові частини:**

- Нерухома котушка, через яку протікає змінний струм і створює магнітне поле.
- Рухоме залізне осердя, яке притягується в магнітному полі котушки.
- Пружина, яка стабілізує положення осердя.
- Стрілка, яка показує значення напруги на шкалі.

### Переваги:

- Проста конструкція і низька вартість.
- Довговічність і надійність.

### Недоліки:

- Підходить лише для змінної напруги.
- Менша точність порівняно з магнітоелектричними або електродинамічними вольтметрами.

Вольтметри електромагнітної системи часто використовуються в промислових умовах, де необхідне просте і надійне вимірювання змінної напруги без вимог до високої точності.

**Вольтметр електростатичної системи**  $\perp$ : Заснований на взаємодії електричних полів між пластинами конденсатора для вимірювання високих напруг.

Основна перевага електростатичного вольтметра полягає в тому, що він може вимірювати високі напруги без протікання струму через прилад, що робить його ідеальним для вимірювання змінних та постійних високих напруг.

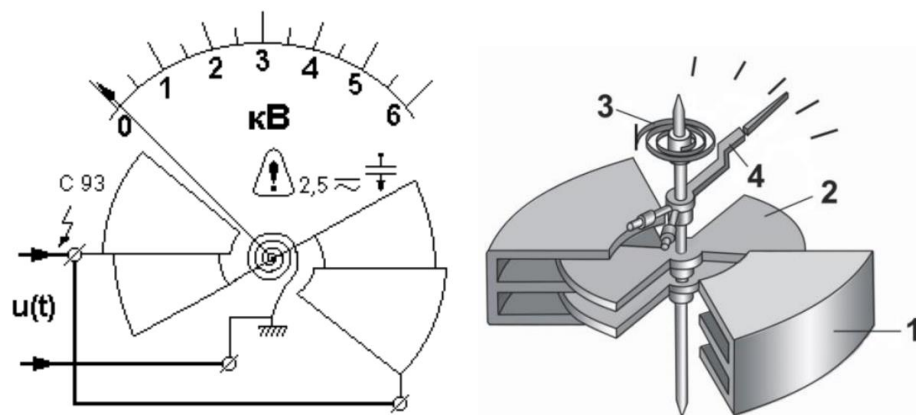


Рисунок 4.7 - Принцип дії приладу електростатичної системи

### Основні характеристики:

- Призначений для вимірювання як змінної, так і постійної високої напруги.
- Не потребує струму для роботи, оскільки використовує електростатичні сили.

### Складові частини:

- Дві основні пластини (одна рухома, інша нерухома), які заряджаються напругою.
- Рухома пластина, яка відхиляється під дією електростатичних сил.
- Пружина або механізм для стабілізації положення рухомої пластини.
- Стрілка або шкала, яка показує значення напруги в залежності від відхилення пластини.

### **Переваги:**

- Може вимірювати дуже високі напруги без протікання струму.
- Підходить для вимірювання напруги змінного та постійного струму.

### **Недоліки:**

- Менш точний для вимірювань низької напруги.
- Складніша конструкція і вища вартість порівняно з іншими системами вольтметрів.

Електростатичні вольтметри часто використовуються в лабораторіях і промислових середовищах, де необхідно безпечно вимірювати високі напруги. Їх також застосовують у галузях, де потрібна мінімальна взаємодія з вимірюваним сигналом, наприклад, в електроніці та фізиці високих напруг.

### **Цифрові вольтметри**

- Використовують аналого-цифрові перетворювачі для представлення результатів на цифровому дисплеї.
- Мають високу точність, дозволяють мінімізувати людську похибку.

### **Методи вимірювання високої та низької напруги**

- Висока напруга вимірюється за допомогою спеціалізованих вольтметрів із високим внутрішнім опором.
- Низька напруга вимірюється приладами з високою чутливістю та малим рівнем шуму.

### **Фактори, що впливають на точність вимірювання**

- Внутрішній опір приладу: чим він вищий, тим менший вплив має прилад на сам ланцюг.
- Температура та інші зовнішні умови можуть призвести до коливань у показниках.

Вимірювання напруги з використанням трансформаторів і подільників напруги є поширеними методами для зниження високих рівнів напруги до безпечних і вимірюваних значень. Це особливо важливо у високовольтних системах, де безпосереднє підключення вимірювального приладу до високої напруги є небезпечним.

### **Вимірювання напруги за допомогою трансформаторів напруги**

**Трансформатори напруги (ТН)** – це спеціальні електричні пристрої, призначені для зниження високої напруги до безпечного рівня, зазвичай до 100 або 110 В, що дозволяє вимірювальним приладам точно і безпечно визначати напругу. Принцип дії трансформатора напруги базується на явищі електромагнітної індукції.

### **Основні компоненти та принцип дії:**

- **Первинна обмотка:** Підключається до високовольтної лінії і має багато витків.
- **Вторинна обмотка:** Зазвичай має менше витків, ніж первинна, і забезпечує низьку напругу на виході, пропорційну вхідній напрузі.

- **Магнітний осердок:** Забезпечує ефективну передачу енергії між обмотками.

Трансформатор напруги дозволяє вимірювати напругу, застосовуючи коефіцієнт трансформації для перерахунку вихідної напруги на реальне значення вхідної високої напруги. Це робить їх незамінними для вимірювань в енергетичних системах і розподільчих підстанціях.

#### **Переваги трансформаторів напруги:**

- Висока точність вимірювань.
- Безпечність, оскільки прилади працюють на низькій напрузі.
- Можливість використання в автоматизованих системах захисту та контролю.

#### **Вимірювання напруги за допомогою подільників напруги**

**Подільники напруги** – це схеми, що використовують резистори, конденсатори або інші елементи для зменшення напруги. Цей метод дозволяє вимірювати як високі, так і низькі напруги шляхом зменшення вхідної напруги до безпечного рівня.

#### **Основні типи подільників:**

1. **Резистивний подільник напруги:** Складається з послідовно з'єднаних резисторів, які розділяють напругу пропорційно опорам. Застосовується для постійного та змінного струму.

2. **Ємнісний подільник напруги:** Використовує конденсатори для розподілу змінної напруги, оскільки конденсаторний опір залежить від частоти сигналу. Часто використовується у високовольтних колах змінного струму.

3. **Резистивно-ємнісний подільник напруги:** Комбінує резистори і конденсатори для точного поділу змінної напруги при високих частотах.

**Принцип дії:** Вхідна напруга розділяється між компонентами подільника (резисторами або конденсаторами), і зменшена напруга знімається з одного з компонентів для вимірювання.

#### **Переваги подільників напруги:**

- Простота конструкції та низька вартість.
- Гнучкість, можливість вимірювати як високі, так і низькі напруги.

#### **Недоліки:**

- Залежність від температури (для резистивних подільників).
- Обмеження частотного діапазону (для ємнісних подільників).

#### **Застосування та вибір методу**

Вибір між трансформаторами напруги та подільниками залежить від конкретних умов:

- **Трансформатори напруги** використовуються в системах з високою потужністю та змінною напругою, наприклад, у електричних підстанціях.

- **Подільники напруги** застосовуються у випадках, коли потрібна компактність та дешевизна, наприклад, у лабораторних вимірюваннях або тестуванні електронного обладнання.

## 4.4 Методи вимірювання сили струму

Принцип роботи амперметра та його вплив на електричне коло, в який він підключений. Важливо підкреслити, що для мінімізації похибок амперметри мають низький внутрішній опір. Також розглядається використання шунтів для вимірювання великих струмів та особливості вимірювання змінного струму.

Основним приладом для вимірювання струму є **амперметр**.

**Принцип роботи амперметра.** Амперметр підключається послідовно в електричне коло, і його внутрішній опір має бути мінімальним, щоб не викликати падіння напруги.

Основні типи амперметрів:

### 1. Амперметр магнітоелектричної системи

Цей тип амперметра працює на основі взаємодії магнітного поля постійного магніту та рухомої рамки з провідником. Підходить лише для вимірювання постійного струму.

- **Основні компоненти:** постійний магніт, рухома котушка, пружина, стрілка.
- **Принцип дії:** Струм, що проходить через котушку, створює магнітне поле, яке взаємодіє з полем постійного магніту, відхиляючи стрілку.
- **Переваги:** Висока точність для постійного струму.
- **Недоліки:** Не підходить для змінного струму без випрямлення.
- **Застосування:** Використовується у низьковольтних ланцюгах постійного струму, таких як батареї та електронні схеми.

### 2. Амперметр електродинамічної системи

Амперметри електродинамічної системи використовують магнітні поля двох котушок: нерухомої та рухомої. Можуть вимірювати як постійний, так і змінний струм.

- **Основні компоненти:** нерухома та рухома котушки, пружина, стрілка.
- **Принцип дії:** Взаємодія магнітних полів, створених струмом у нерухомій та рухомій котушках, викликає відхилення стрілки.
- **Переваги:** Підходить для вимірювання як постійного, так і змінного струму.
- **Недоліки:** Складніша конструкція і вища вартість.
- **Застосування:** Використовується в лабораторіях і промисловості для точних вимірювань струму змінного та постійного струму.

### 3. Амперметр феродинамічної системи

Феродинамічний амперметр є різновидом електродинамічного амперметра, але з використанням феромагнітного осердя для посилення магнітного поля. Призначений для вимірювання змінного струму.

- **Основні компоненти:** нерухома котушка, рухома котушка з феромагнітним сердечником, стрілка.
- **Принцип дії:** Феромагнітний осердя підсилює магнітне поле, сприяючи точності вимірювання.

- **Переваги:** Висока чутливість для вимірювань змінного струму.
- **Недоліки:** Вимірює тільки змінний струм.
- **Застосування:** Використовується у високоточних вимірюваннях змінного струму, наприклад, у приладах електричних лабораторій.

#### **4. Амперметр електромагнітної системи**

Електромагнітний амперметр заснований на притяганні залізного осердя в магнітне поле котушки. Використовується для вимірювання змінного струму.

- **Основні компоненти:** котушка, рухоме залізне осердя, пружина, стрілка.
- **Принцип дії:** Магнітне поле котушки, через яку проходить струм, притягує залізне осердя, відхиляючи стрілку.
- **Переваги:** Простота конструкції та надійність.
- **Недоліки:** Менша точність порівняно з іншими типами.
- **Застосування:** Використовується у промислових умовах для вимірювання змінного струму, де точність не є критичною.

#### **5. Амперметр термоелектричної системи**

Термоелектричний амперметр вимірює струм через нагрівання провідника і генерування термоелектрорушійної сили (ЕРС), пропорційної силі струму. Підходить для вимірювання високочастотного змінного струму.

- **Основні компоненти:** нагрівальний провідник, термopара, стрілка.
- **Принцип дії:** Струм нагріває провідник, що генерує ЕРС в термopарі, яка вказує силу струму.
- **Переваги:** Може вимірювати змінний струм високої частоти.
- **Недоліки:** Тривалий час стабілізації.
- **Застосування:** Використовується для вимірювання високочастотного струму в радіотехнічних пристроях.

Ці різні системи амперметрів використовуються у відповідних сферах залежно від характеристик струму, умов вимірювання та вимог до точності.

Вимірювання струму за допомогою трансформаторів струму і шунтів дозволяє точно вимірювати високі струми, які безпосередньо важко виміряти звичайними приладами. Обидва ці методи дозволяють знизити рівень струму до безпечного та вимірюваного значення.

#### **Вимірювання струму за допомогою трансформаторів струму**

**Трансформатори струму (ТС)** – це прилади, які перетворюють високий первинний струм на пропорційний низький вторинний струм, який можна виміряти звичайними амперметрами. Їхній принцип роботи заснований на явищі електромагнітної індукції.

#### **Основні компоненти та принцип дії:**

- **Первинна обмотка:** Підключається до лінії високого струму, зазвичай складається з одного або кількох витків.

- **Вторинна обмотка:** Має велику кількість витків, що забезпечує перетворення на низький струм.
- **Магнітний осердя:** Сприяє передачі магнітного поля від первинної обмотки до вторинної.

При вимірюванні високих струмів за допомогою ТС коефіцієнт трансформації дозволяє визначити первинний струм на основі значення вторинного струму. Наприклад, якщо коефіцієнт трансформації дорівнює 1000:5, то при вимірюванні 5 А на вторинній обмотці первинний струм буде 1000 А.

#### **Переваги трансформаторів струму:**

- Забезпечують електричну ізоляцію вимірювальних приладів від високих струмів.
- Дозволяють вимірювати високі струми без ризику перегрівання приладу.
- Забезпечують високу точність і безпечність вимірювання.

**Застосування:** Трансформатори струму широко використовуються в енергетиці, на підстанціях і в промислових установках для вимірювання великих струмів.

#### **Вимірювання струму за допомогою шунтів**

**Шунти** – це резистори з низьким опором, що підключаються паралельно з вимірювальним приладом. Вони використовуються для зниження частини струму, що проходить через амперметр, і дозволяють вимірювати високі струми, оскільки більша частина струму проходить через шунт.

#### **Основні компоненти та принцип дії:**

- **Шунт (низькоомний резистор):** Підключається паралельно амперметру, викликаючи падіння напруги, яке пропорційне струму через нього.
- **Амперметр:** Вимірює падіння напруги на шунті, що дозволяє обчислити загальний струм.

Знаючи значення опору шунта, можна визначити силу струму через нього за допомогою закону Ома  $I = U / R$ , де  $I$  – сила струму,  $U$  – падіння напруги на шунті,  $R$  – опір шунта.

#### **Переваги шунтів:**

- Простота конструкції і низька вартість.
- Можливість точного вимірювання струму в низьковольтних колах.

#### **Недоліки шунтів:**

- Падіння напруги на шунті призводить до невеликої втрати потужності.
- Шунти можуть перегріватися при дуже високих струмах, що обмежує їх застосування.

**Застосування:** Шунти часто використовуються в низьковольтних ланцюгах, таких як акумуляторні системи та електронні пристрої, де струми можуть бути високими, але необхідна низька вартість і компактність.

Таблиця 4.1 - Порівняння трансформаторів струму та шунтів

Параметр	Трансформатори струму	Шунти
Тип струму	Змінний струм	Постійний і змінний струм
Безпека	Забезпечують електричну ізоляцію	Не забезпечують ізоляції
Точність	Висока	Відносно висока
Втрати потужності	Низькі	Помітні
Використання	Високовольтні та високострумкові лінії	Низьковольтні кола
Вартість	Висока	Низька

Обидва методи – трансформатори струму та шунти – ефективні для вимірювання струму, але їхній вибір залежить від конкретних вимог до вимірювання та умов експлуатації.

#### 4.5 Сучасні електронні методи вимірювання

Сучасні електронні прилади, такі як осцилографи та цифрові мультиметри, стали незамінними інструментами для вимірювання напруги та струму. Осцилографи дозволяють побачити змінну напругу у вигляді графіку, а мультиметри забезпечують вимірювання кількох електричних величин. Також пояснюються датчики Холла, які використовуються для безконтактного вимірювання сили струму.

Сучасні електронні прилади дозволяють з високою точністю вимірювати змінні та постійні струми та напругу. До таких приладів належать:

##### **Осцилографи**

- Вимірюють змінну напругу і дозволяють спостерігати форму сигналу на екрані.
- Особливо корисні для вимірювання характеристик високочастотних сигналів.

##### **Цифрові мультиметри**

- Виконують вимірювання напруги, сили струму, опору та інших параметрів.
- Мультиметри можуть мати функції фільтрації шуму та стабілізації, що підвищує точність.

##### **Датчики Холла**

- Використовуються для безконтактного вимірювання сили струму.
- Принцип роботи заснований на зміні магнітного поля, що індукується струмом.

## 4.6 Типові похибки при вимірюванні напруги та струму

Типові похибки, що виникають при вимірюванні напруги та струму, можна класифікувати на декілька основних категорій:

### 1. Основна (інструментальна) похибка

- Виникає через недосконалість вимірювального приладу і його обмежену точність. Наприклад, шкала чи цифровий дисплей приладу має певну роздільну здатність, через що виміряне значення може відрізнятись від реального.

- Часто задається виробником приладу як похибка в процентах від вимірюваного значення (наприклад,  $\pm 0.5\%$ ).

### 2. Зсувна похибка (нульова похибка)

- Виникає, коли прилад показує ненульове значення за відсутності вимірюваної величини.

- Наприклад, якщо амперметр показує ненульовий струм при розімкненому колі.

- Часто є результатом неправильного калібрування чи збою в приладі.

### 3. Температурна похибка

- Виникає через зміну температури, яка може впливати на електроніку приладу та його характеристики.

- Деякі прилади можуть мати значну температурну залежність, що потрібно враховувати при високоточних вимірюваннях.

### 4. Частотна похибка

- У випадках вимірювання змінної напруги або струму, особливо на високих частотах, прилади можуть мати частотну залежність.

- Наприклад, звичайні мультиметри можуть мати похибки при вимірюванні частотних сигналів через обмеження смуги пропускання.

### 5. Похибка через опір вимірювального приладу

- Наприклад, внутрішній опір вольтметра може спотворювати значення вимірюваної напруги, особливо в низькоомних колах.

- Амперметри, зі свого боку, повинні мати мінімальний внутрішній опір, інакше вони будуть знижувати значення струму, що вимірюється, що також призводить до похибки.

### 6. Похибка квантування (для цифрових приладів)

- Цифрові прилади мають обмежену роздільну здатність, що призводить до квантування сигналу.

- Це особливо помітно при вимірюванні малих значень, коли квантування є істотною частиною відносної похибки.

### 7. Індукційна похибка

- Виникає у вимірювальних пристроях поблизу джерел електромагнітних полів.

- Поля можуть наводити додаткові струми або напругу, що спотворюють результати вимірювання. Це характерно для високовольтних або промислових електромереж.

## 8. Похибка через старіння компонентів

- З часом електронні компоненти, такі як резистори або конденсатори, можуть змінювати свої параметри, що призводить до змін в характеристиках приладу і, як результат, до похибки.

### Приклад: типові похибки мультиметри

Для сучасного цифрового мультиметра типові похибки можуть виглядати так:

- **Напруга:**  $\pm(0.5\% + 2 \text{ цифри})$  на низьких діапазонах.
- **Струм:**  $\pm(1\% + 3 \text{ цифри})$  через труднощі у вимірюванні малих струмів з високою точністю.

Кожен тип похибки потрібно враховувати залежно від умов експлуатації та точності, яка потрібна для конкретного застосування.

## Висновки

Значення точності вимірювань. Вимірювання напруги та струму є основою роботи електронних і електротехнічних систем, від яких залежить ефективність, надійність і безпека обладнання.

Основні параметри. Електрична напруга та сила струму є ключовими характеристиками електричних кіл. Напруга вимірюється в вольтах (В), а струм – в амперах (А). Їх взаємозв'язок описується законом Ома.

### Методи вимірювання

- Прямі методи забезпечують швидке отримання значень (вольтметри, амперметри).

- Непрямі методи використовують обчислення на основі інших величин, що особливо важливо для складних систем.

### Прилади для вимірювання

- Для вимірювання напруги використовують різні типи вольтметрів (магнітоелектричні, електродинамічні, феродинамічні, електромагнітні, електростатичні).

- Амперметри (магнітоелектричні, електродинамічні, феродинамічні, термоелектричні) дозволяють точно вимірювати силу струму залежно від умов.

Високовольтні системи. Для безпечного вимірювання високих напруг і струмів застосовують трансформатори напруги та струму, а також подільники напруги та шунти.

Сучасні технології. Використання осцилографів, цифрових мультиметрів і датчиків Холла дозволяє підвищити точність і розширити функціональність вимірювань.

Фактори похибок. Точність вимірювань залежить від інструментальних, температурних, частотних похибок, внутрішнього опору приладів, а також старіння компонентів.


Таким чином, вибір методу і приладу для вимірювання залежить від конкретних умов і необхідної точності, а розуміння фізичних принципів та характеристик вимірювальних пристроїв є основою ефективних досліджень та роботи в електротехніці.

#### Контрольні запитання до теми 4

1. Що таке електрична напруга, як вона визначається і в яких одиницях вимірюється?
2. Як визначається сила струму і чим вона характеризується?
3. Як закон Ома зв'язує напругу, струм і опір?
4. У чому полягає принцип роботи магнітоелектричного вольтметра?
5. Які переваги й недоліки електродинамічного вольтметра?
6. Для яких цілей використовують феродинамічні вольтметри?
7. Як принцип роботи амперметра забезпечує мінімальний вплив на коло?
8. Які типи амперметрів використовуються для постійного і змінного струму?
9. Чому шунти є необхідними для вимірювання високих струмів?
10. Які переваги та недоліки використання трансформаторів напруги для вимірювання?
11. У яких випадках використовують подільники напруги, і як їх вибір залежить від умов?
12. Як трансформатори струму дозволяють безпечно вимірювати високі струми?
13. Які функції виконує осцилограф у процесі вимірювань?
14. Як принцип Холла використовується для безконтактного вимірювання струму?
15. Які основні похибки виникають під час вимірювання електричних величин?
16. Як частотна похибка впливає на вимірювання змінної напруги?
17. Чому температурна стабільність є важливою для точності вимірювань?

#### Використана література до теми 4

1. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
2. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Житомир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
3. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.

- 
4. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.
  5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
  6. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.
  7. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
  8. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: навчальний посібник. Київ: Знання-Прес, 2003. 180 с.

## ТЕМА № 5: ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ: МЕТОДИ І ПРИЛАДИ

Основи вимірювання опору за законом Ома. Метод мостів для вимірювання опору: місток Уїтстона. Використання омметрів та мультиметрів для вимірювання опору. Способи вимірювання опору низьких і високих значень. Температурна залежність опору матеріалів і її врахування. Технічні особливості вимірювання контактного опору. Висновки.

Електричний опір – це важлива характеристика електричних ланцюгів, яка визначає здатність матеріалу перешкоджати проходженню електричного струму. Вимірювання опору використовується в багатьох сферах, включаючи електроніку, енергетику та телекомунікації.

### 5.1 Основні поняття та одиниці вимірювання опору

Електричний опір ( $R$ ) вимірюється в омах (Ом). Закон Ома визначає взаємозв'язок між струмом ( $I$ ), напругою ( $U$ ) і опором:

$$R = \frac{U}{I}$$

де  $R$  - опір,  $U$  - напруга,  $I$  - сила струму.

### 5.2 Методи вимірювання опору

Існують кілька методів вимірювання електричного опору, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Розглянемо основні з них:

Прямий метод вимірювання

Цей метод заснований на законі Ома і передбачає вимірювання напруги і струму в колі, а потім розрахунок опору. Основні етапи:

- Підключення резистора до джерела напруги.
- Вимірювання напруги на резисторі.
- Вимірювання сили струму, що протікає через резистор.
- Обчислення опору за формулою  $R = \frac{U}{I}$

*Переваги:* Простота виконання, особливо для середніх і великих значень опору.

*Недоліки:* Чутливий до неточностей вимірювальних приладів.

Активні опори твердих провідників звичайно вимірюють при постійному струмі, провідників, які мають високу вологість – при змінному.

Найчастіше вимірювання здійснюють **методом, за допомогою амперметра і вольтметра** (особливо при вимірюванні опорів обмоток потужних електричних машин). Похибка залежить від похибок приладів і схеми їх вмикання і лежить в межах 1..5%.

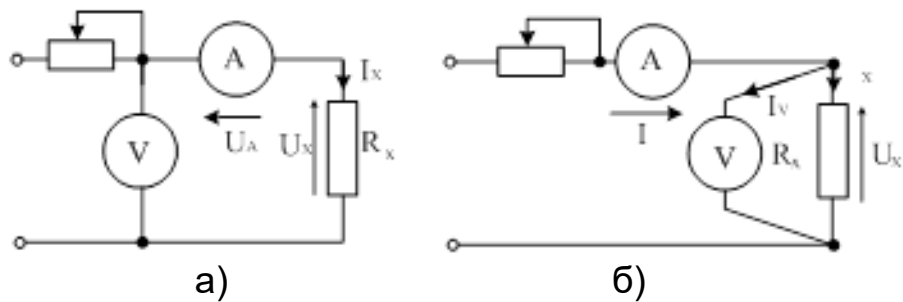


Рисунок 5.1 - Визначення опору методом амперметра, вольтметра

Схема а):  $R_x = \frac{U}{I_x} = \frac{U_x + U_a}{I_x} = R_x + R_a$ ,  $\delta = \frac{\Delta R_A}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}$  - великі опори,

Схема б):  $R_x = \frac{U}{I_x} = \frac{U_x}{I_x + I_v} = \frac{R_x}{1 + \frac{R_x}{R_v}}$ ,  $\delta = \frac{R_x}{R_v + R_x}$  - для малих опорів

На основі цього методу заснована дія **омметрів** – приладів для вимірювання активного опору.

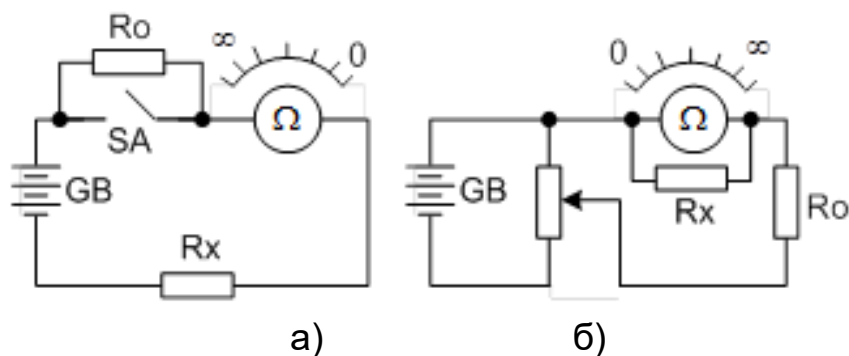


Рисунок 5.2 - Принцип дії Омметрів

Прилади для вимірювання опорів до 1кОм мають паралельну схему вмикання (б) і пряму шкалу; прилади для опорів порядку кількох тис. Ом виконуються по послідовній схемі (рис 5.1 а) і мають зворотню шкалу. При вмиканні джерела живлення струм в колі:  $I = \frac{E}{R_x + R_0 + r_0 + r_n}$ , де E- ЕРС джерела,  $R_x$  - вимірюваний опір,  $R_0$  - обмежуючий опір,  $r_0$ ,  $r_n$  - внутрішній опір джерела живлення і приладу. Оскільки значення  $R_0$ ,  $r_0$ ,  $r_n$  постійні, то значення струму залежить від  $R_x$ , і шкалу приладу можна проградувати в одиницях опору. Оскільки величина ЕРС живлення може змінюватись з часом, в приладі передбачено магнітний шунт, що регулює чутливість приладу, змінюючи магнітну індукцію в зазорі МЕ ВМ. Перед вимірюванням натискають кнопку SA, шунтуючи вимірюваний опір, і за допомогою магнітного шунта встановлюють стрілку на контрольну відмітку. Відпускають кнопку і вмикають вимірюваний опір, значення якого знімають по шкалі.

В омметрах послідовної схеми при вимірюванні великих опорів через рамку буде проходити малий струм, тому для встановлення стрілки на нуль застосовують потенціометр, закорочуючи  $R_x$ .

Для вимірювань в діапазоні  $10^{-5}..10^9$  Ом використовують магнітоелектричні омметри та мегомметри, при  $10^{14}..10^{15}$  Ом – електронні мегомметри (на основі МЕ логотричних ВМ, в яких послідовно до однієї рамки вмикають зразковий опір, до другої, рухомої - вимірюваний) та тераомметри, похибка вимірювання 5-10%.

При вимірюванні малих опорів треба звернути увагу на усунення впливу опорів з'єднувальних провідників та контактів. При великих – опорів ізоляції.

### Метод мостів (мостовий метод)

Метод Вітстона – популярний метод вимірювання малих опорів за допомогою мостових схем. Схема Вітстона включає чотири резистори, два з яких відомі, а один є об'єктом вимірювання. Балансування мосту дозволяє точно визначити невідомий опір.

Мостова схема (місток Вітстона, англ. фізика) складається з чотирьох опорів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_x$ ,  $R$ , з'єднаних послідовно у вигляді чотирикутника (рис. 1), причому точки А, В, С, D називають вершинами. Протилежні вершини з'єднують діагоналями. Опори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_x$ ,  $R$ , що включені між двома сусідніми вершинами, утворюють так звані плечі мостка.

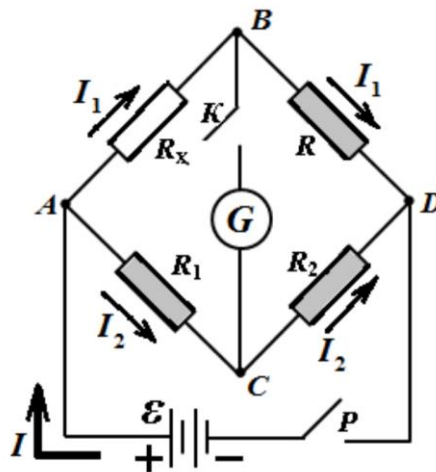



Рисунок 5.3 - Мостова схема вимірювання опору

Назва «мостове коло» пояснюється тим, що діагоналі, як містки, з'єднують дві протилежні вершини. В одну діагональ цього чотирикутника включене джерело живлення  $\varepsilon$ , в іншу - гальванометр  $G$ .

Гальванометром називається високочутливий електровимірювальний прилад для вимірювання малих струмів, напруг і зарядів. Нуль розміщений на середині шкали гальванометра, що дозволяє фіксувати струми протилежних напрямків.



Опір  $R_x$ , що вимірюється. Утворює ділянку АВ, а в ділянку ВD включають магазин опорів, що дозволяє підбирати еталонний опір R з великою точністю.

**Переваги:** Висока точність для малих опорів.

**Недоліки:** Складність налаштування та чутливість до зовнішніх факторів.

#### **Метод заміщення**

Цей метод застосовується для вимірювання опорів в широкому діапазоні. Замість невідомого опору послідовно підключається відомий резистор, а вимірювальний прилад дозволяє визначити різницю.

**Переваги:** Універсальність.

**Недоліки:** Потребує точних еталонних резисторів.

#### **Метод падіння напруги**

Цей метод використовується для вимірювання дуже великих опорів, при якому невелика зміна струму в колі не суттєво впливає на точність вимірювань. Вимірюється падіння напруги через досліджуванний опір при відомому струмі.

**Переваги:** Простота в реалізації.

**Недоліки:** Менш точний для малих опорів.

### **5.3 Прилади для вимірювання опору**

Для вимірювання опору використовують різноманітні прилади, від аналогових до цифрових.

#### **Омічні вимірювачі (омметри)**

Ці прилади спеціально розроблені для вимірювання опору і можуть бути аналоговими або цифровими. Омметри зазвичай включаються в коло з досліджуваним опором і мають шкалу з одиницями омів.

#### **Мостові вимірювачі**

Міст Вітстона або інші мостові пристрої застосовуються для високоточних вимірювань малих опорів, особливо в лабораторних умовах.

#### **Прилади порівняння. Вимірювальні мости**

Вимірювання мостовим методом засноване на використанні диференціального (різницевого) методу вимірювань.

Схема одинарного моста рис.5.4.

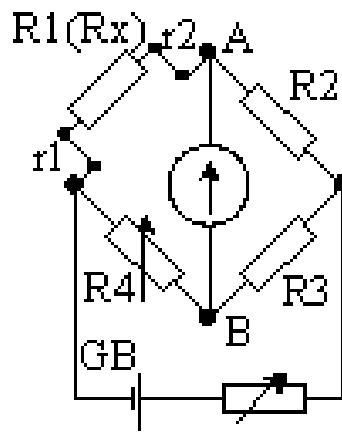


Рисунок 5.4 - Схема одинарного моста

Вимірюваний опір  $R_x$  вмикають в одне з плеч моста, діагоналі якого підключають до джерела живлення і нуль-індикатора (гальванометр, мікроамперметр з нулем посередині шкали). Плечі  $R_4$  і  $R_3$  виконують у вигляді магазинів опорів, за допомогою  $R_3$  встановлюють ряд значень відношення  $R_3/R_2$  (звичайно кратні 10) а за допомогою підбору  $R_4$  врівноважують міст (зрівноважений міст).

Умова рівноваги моста ( $I_r=0$  або  $U_{AB}=0$ ):  $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ , тоді значення невідомого опору:  $R_x = R_1 = R_4 \cdot \frac{R_2}{R_3}$ . Відлік вимірюваного опору здійснюють по значенню встановленому ручками магазинів опорів.

Незрівноважені мости вимірюють величину відхилення опору від номінального  $R_n$ , залежно від струму чи напруги в діагоналі індикації і використовуються для визначення відхилення  $R_x$  від  $R_n$  в відсотках.

Діапазон вимірювання моста  $10^{-3} \dots 10^8$  Ом.

Для вимірювання опорів в діапазоні від 100 до  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  застосовують подвійні (шестиплечі) мости постійного струму рис.5.5.

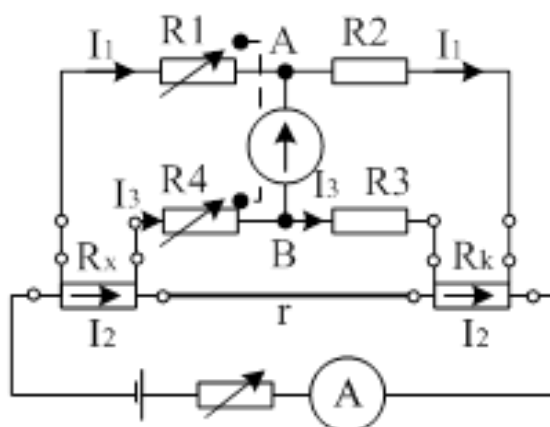


Рисунок 5.5 - Схема подвійного мост

Умова зрівноваження моста за 1 з-ном Кіргофа:

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_3 r}{r+R_3+R_4} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_4}{R_3} \right) = R_N \frac{R_1}{R_2} + d,$$

при  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = 0$   $d=0$ , тоді  $R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2}$ .

Отже опори плеч  $R_1$   $R_4$  а також  $R_2$   $R_3$  вибираються попарно зрівноваженими. Такий метод дозволяє вимірювати опори при великому струмовому навантаженні.

**Автоматичні мости постійного струму** – зрівноваження відбувається автоматично рис. 5.6. Підсилена напруга надходить до керуючої обмотки реверсивного двигуна РД, ротор якого пов'язаний з повзунком реохорда і покажчиком приладу. Ротор буде обертатись, доки не наступить рівновага моста і напруга розбалансу  $U = 0$ .

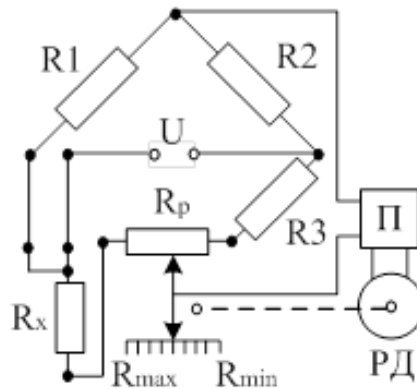


Рисунок 5.6 - Схема автоматичного мосту

## 5.4 Цифрові мультиметри

Цифрові мультиметри – це універсальні прилади, які дозволяють вимірювати напругу, струм і опір. Більшість сучасних мультиметрів мають функцію автоматичного визначення діапазону і надають результати з високою точністю.

## 5.5. Мегаомметри

Мегаомметри використовуються для вимірювання великих опорів (мегаомів і більше), особливо в умовах високої напруги. Їх часто застосовують для тестування ізоляційних матеріалів.

Прилад М416: на панелі має 4 клеми. Для грубих вимірювань затискачі 1 і 2 з'єднують перемичкою.

Для вимірювання опору заземлення і опору ізоляції використовують **мегаомметри**. Прилад містить джерело живлення (генератор постійного струму з паралельним збудженням і ручним приводом).

Кут відхилення стрілки залежить лише від відношення струмів в рамках і не залежить від поданої напруги. Послідовно з однією рамкою вмикають зразковий опір, а до іншої – вимірюваний. Прилад має кілька границь вимірювання. Перед вимірюванням слід переконавшись, що досліджуване коло не знаходиться під напругою.

Для вимірювання опору ізоляції слід відімкнути все електрообладнання. Заміри опорів ізоляції здійснюються між фазними провідниками (А-В, В-С, С-А), між фазними і нейтральними провідниками (А-Н, В- Н, С- Н), між фазними провідниками і землею, між нейтральним провідником і землею. Вимірювання ізоляції здійснюється від найбільш дальньої точки вимірювальної лінії до автоматичного вимикача. Допустимий опір ізоляції не повинен бути меншим 0,5 МОм.

Для **вимірювання повного опору** по змінному струму використовують метод трьох приладів: амперметра, вольтметра і ватметра. Тоді значення повного опору визначається:

$$Z = \frac{U}{I}, R = \frac{P}{I^2}, X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{\sqrt{U^2 \cdot I^2 - P^2}}{I^2}.$$

## 5.6 Класи точності вимірювальних приладів

Вимірювальні прилади для опору поділяються на класи точності, що визначаються похибкою результатів. Найбільш точні прилади мають клас 0,1-0,5, а менш точні – до 10.

### Фактори, що впливають на точність вимірювань

На точність вимірювання опору впливають такі фактори:

- **Температура навколишнього середовища:** Зміна температури може змінювати опір матеріалу.
- **Частота струму:** Для деяких матеріалів опір змінюється з частотою змінного струму.
- **Точність вимірювальних приладів:** Наявність похибок у приладах може призводити до неточностей.

### Приклад.

#### Вимірювання опору заземлення (0,4 Ом)

Заземленню підлягають всі металеві корпуси електрообладнання, короби, металеві корпуси кабелів, труби водопроводу і каналізації. Опір заземлюючих провідників не повинен перевищувати 0,05 Ом. Вимірювання проводиться від електрообладнання до контуру заземлення (шина заземлення).

**Принцип вимірювання** розглянемо на методі амперметра і вольтметра.

Якщо зібрати коло (рис. 5.7 а): джерело живлення, амперметр, головний заземлювач А, земля, допоміжний заземлювач В або електрод, джерело, то, вимірявши струм і напругу в мережі, отримаємо:

$\frac{U_v}{I_A} = R_c + R_A$  , якщо електроди однакові, то  
 $R_c = \frac{U_v}{2I_A}$  або  $R_c = \frac{(\varphi_A - \varphi_B)}{2I_A} = \frac{E}{2I_A}$  , де  
 $E$  – ЕРС джерела,  $\varphi_A, \varphi_B$  - потенціали точок А і В.

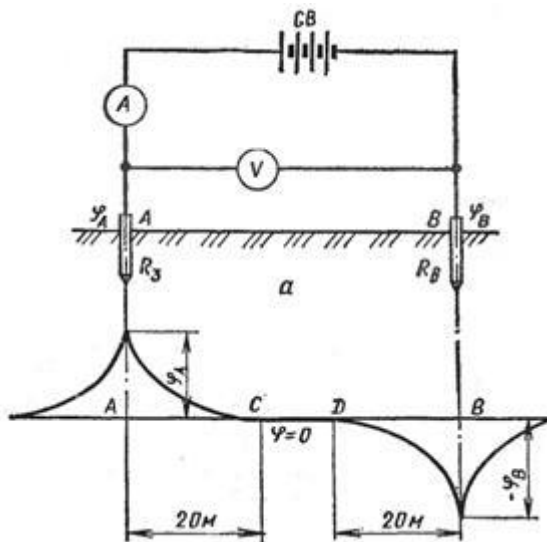


Рисунок 5.7 - Вимірювання опору заземлення методом амперметра і вольтметра

З рис. 5.7 видно, що потенціал землі на відстані 20 м від заземлення практично = 0, отже. Якщо в цьому місці встановити ще один допоміжний електрод (зонд) і виміряти електростатичним вольтметром напругу між точкою А і зондом С, то значення опору:  $R_c = \frac{U_v}{I}$ .

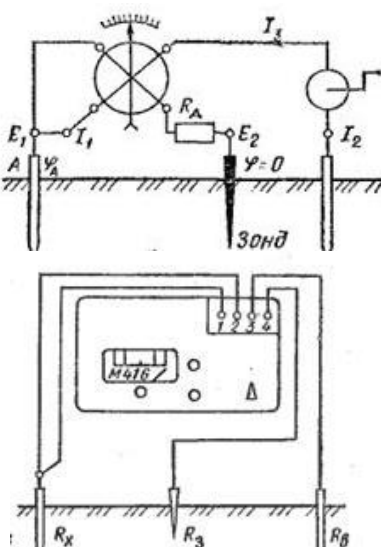



Рисунок 5.8 - Схема вимірювання заземлення




На рис. 5.8 схема вимірювача заземлення МС-0,8. Один кінець джерела живлення підключений до однієї з котушок логометра і далі до головного електроду (заземлювачу). Струм в цій котушці пропорційний струму заземлення. В коло другої котушки ввімкнені додатковий опір і зонд. Струм в котушці пропорційний напрузі між головним електродом і зондом. Тоді кут відхилення стрілки приладу пропорційний вимірюваному опору заземлювача

### **Висновок**

Різні методи вимірювання опору підходять для різних умов і цілей. Вибір конкретного методу та приладу залежить від діапазону опорів, які потрібно виміряти, і точності вимірювання.

### **Контрольні запитання до теми 5**

1. Що таке електричний опір, як він визначається і в яких одиницях вимірюється?
2. Як закон Ома пов'язаний із вимірюванням електричного опору?
3. Які основні методи вимірювання електричного опору існують і в чому їх суть?
4. Як працює прямий метод вимірювання опору, і які його переваги та недоліки?
5. Що таке метод мостів, наприклад, міст Вітстона, і як він використовується для вимірювання опору?
6. Як працює метод заміщення для вимірювання невідомого опору?
7. Що таке метод падіння напруги і коли його доцільно використовувати?
8. Які прилади використовуються для вимірювання опору, і чим відрізняються омметри від мегомметрів?
9. Як цифрові мультиметри виконують вимірювання опору і які їхні переваги?
10. Для яких цілей використовуються мегаомметри, і як вимірюється опір ізоляції?
11. Як визначається опір заземлення і які методи для цього застосовуються?
12. Які класи точності вимірювальних приладів існують і як вони впливають на результати вимірювань?
13. Які фактори, такі як температура і частота струму, впливають на точність вимірювання опору?
14. Що таке автоматичні мости і як вони полегшують вимірювання опору?
15. Які типи похибок виникають під час вимірювання опору і як їх можна мінімізувати?
16. Як метод трьох приладів (амперметр, вольтметр, ватметр) використовується для визначення повного опору?

- 
17. Чим особливі вимірювання опорів в умовах високої напруги або високої точності?
  18. Як усувається вплив опорів з'єднувальних провідників і контактів при вимірюванні малих опорів?
  19. У яких випадках застосовуються подвійні або автоматичні мости для вимірювання опорів?
  20. Які особливості вимірювання опорів за допомогою мостових схем у лабораторних умовах?

### **Використана література до теми 5**

1. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
2. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Житомир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
3. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
4. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.
5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
6. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.
7. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
8. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: навчальний посібник. Київ: Знання-Прес, 2003. 180 с.

## ТЕМА 6 "ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ"

Види потужності: активна, реактивна, повна. Методи вимірювання потужності в ланцюгах постійного та змінного струму. Принцип роботи ватметрів. Способи вимірювання електричної енергії. Використання електродічисельників. Похибки у вимірюванні потужності та енергії та методи їх оцінки. Висновки.

### 6.1. Основні поняття потужності та енергії в електричних колах

**Активна потужність (P)** – це потужність, яка фактично використовується для виконання корисної роботи. Вимірюється у ватах (Вт) і визначається за формулою:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

де  $U$  – напруга,  $I$  – струм, а  $\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності, що залежить від фази між струмом і напругою.

**Реактивна потужність (Q)** – потужність, яка циркулює між джерелом і споживачем, не виконуючи корисної роботи. Вимірюється у вар (вар) і обчислюється як:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

**Повна потужність (S)** – сукупна потужність у системі, яка включає активну та реактивну потужності. Вимірюється у вольт-амперах (ВА) і визначається як:

$$S = U \cdot I$$

**Енергія (W)** – кількість роботи, яку виконує електричне коло за певний період часу. Вимірюється в джоулях (Дж) або ват-годинах (Вт·год).

### 6.2 Типи вимірювальних приладів для потужності та енергії

**Ватметри** – використовуються для вимірювання активної потужності. Зазвичай складаються з двох котушок: струмової та напругової, які взаємодіють, створюючи вимірюване значення потужності.

**Реактивні ватметри** – спеціалізовані прилади для вимірювання реактивної потужності, що працюють на основі фазового зсуву струму та напруги.

**Лічильники енергії** – пристрої для вимірювання електричної енергії, яку споживає споживач. Бувають механічні та електронні. Електронні лічильники можуть також вимірювати потужність у реальному часі та зберігати дані.

### 6.3 Методи вимірювання потужності та енергії

**Метод прямого вимірювання** – використання ватметрів або лічильників, які під'єднуються безпосередньо до кола.

**Метод опосередкованого вимірювання** – використання законів Кирхгофа та Ома для обчислення потужності на основі інших вимірюваних параметрів.

**Цифрові методи** – за допомогою осцилографів та цифрових ватметрів, які вимірюють миттєві значення струму та напруги, обчислюючи потужність в реальному часі.

### 6.4. Фактор потужності та його оптимізація

Фактор потужності  $\cos\varphi$  важливий для підвищення ефективності системи. При зменшенні коефіцієнта потужності збільшуються втрати в електричних колах, що може призвести до зниження продуктивності.

Використання конденсаторів або синхронних компенсаторів допомагає підвищити коефіцієнт потужності, зменшивши реактивну складову потужності.

### 6.5 Розрахунок енергії в електричних колах

Енергія обчислюється шляхом інтегрування потужності за часом:

$$W = \int P(t) dt$$

У практиці це часто зводиться до множення середнього значення потужності на час роботи для стаціонарних режимів.

Вимірювання активної електричної потужності й енергії в симетричних трифазних колах одним приладом

Оскільки схеми включення ватметра й лічильника електричної енергії однакові, під поняттям “прилад” ми будемо мати на увазі обидва зазначених засоби вимірювань.

Якщо схема включення навантаження - зірка з доступною нейтралю, то прилад включається відповідно до рис. 6.1 а), і загальна активна потужність й енергія, споживана навантаженням виходить множенням на три показання приладу.

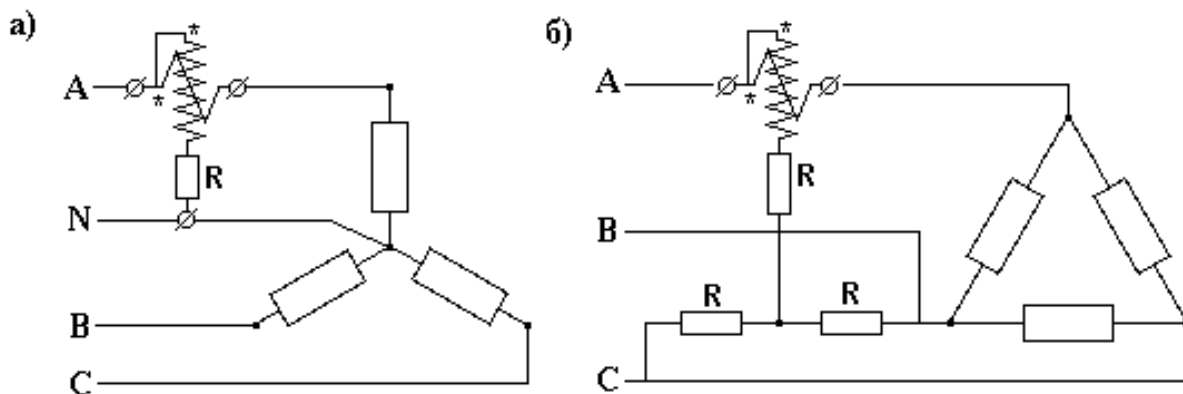


Рисунок 6.1 – Включення ватметра й лічильника електричної енергії для вимірювань у симетричних трифазних ланцюгах з доступною й недоступною нейтраллю

При недоступній нейтралі в симетричному трифазному ланцюзі, коли, наприклад, навантаження включене за схемою трикутника (рис. 6.1 б), роблять штучну нейтраль, як показано на малюнку. Для цього між фазами В і С включають послідовно два резистори, опір кожного з яких дорівнює опору паралельного кола приладу (ватметра або лічильника енергії). Точку їхнього з'єднання підключають до негенераторного затискача паралельного кола приладу. У результаті ця точка стає нейтраллю, якщо, звичайно, навантаження симетричне.

Загальну потужність й енергію, споживану в трифазному ланцюзі, підраховують, множачи на 3 показання відповідних приладів.

Вимірювання реактивної електричної потужності й енергії в симетричних трифазних колах одним приладом

Крім активної потужності й енергії, що витрачає споживачами, дуже важливо контролювати реактивні компоненти потужності й енергії, на вироблення яких затрачаються дефіцитні енергоресурси, але не використовуються в чинність їхнього перетворення в марне для практичної реалізації електромагнітне випромінювання. При перевищенні норм, встановлених на допущену долю цих реактивних компонентів, до споживачів пред'являються штрафні санкції.

Як відомо, реактивна потужність виражається формулою

$$P_{PE} = U_D I_D \cdot \sin \varphi = U_D I_D \cdot \cos(90^\circ - \varphi)$$

Із цього випливає, що для вимірювання реактивної потужності в однофазному ланцюзі або в кожній фазі трифазного кола окремо необхідно зрушити фазу в одному з колів ватметра або лічильника енергії на  $90^\circ$ . Практично це можна зробити тільки в паралельному ланцюзі даних приладів.

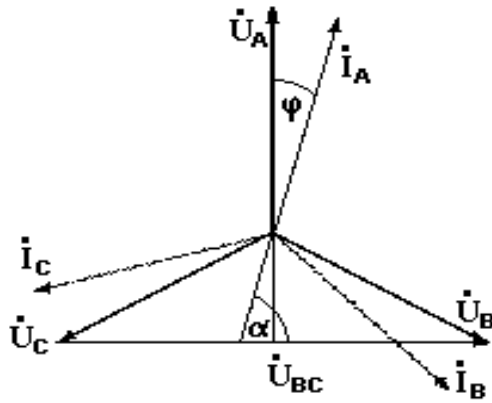


Рисунок 6.2 - До вимірювання реактивної потужності й енергії

Але, якщо трифазний коло симетричний, навантаження включене по схемі зірка, то в цьому випадку (див. векторну діаграму рис. 6.2):

- лінійні струми однакові по модулі й дорівнюють струмам у фазах,
- вектори лінійних напруг ортогональні векторам протилежних фазових напруг, наприклад, вектор  $\dot{U}_{BC}$  ортогональний вектору  $\dot{U}_A$ ,

- лінійні напруги однакові по модулю, їхні модулі більше модулів фазних напруг в  $\sqrt{3}$ , тобто  $|\dot{U}_{BC}| = |\dot{U}_A| \cdot \sqrt{3}$ ,

- загальна споживана потужність й електрична енергія рівні потроєної фазової потужності й, відповідно, потроєної фазової енергії.

Тому при включенні ватметра по першій зі схем рис. 6.3 обертаючий момент, що діє на його рухому частину, пропорційний величині  $(\dot{U}_{BC})_D (\dot{I}_A)_D \cdot \cos \alpha$ , де  $\alpha$  - кут між векторами  $\dot{I}_A$  й  $\dot{U}_{BC}$ ,  $(\dot{U}_{BC})_D$  - діюче значення лінійної напруги  $\dot{U}_{BC}$ ,  $(\dot{I}_A)_D$  - діюче значення лінійного, у цьому випадку також і фазного струму  $\dot{I}_A$ .

Оскільки  $|\dot{U}_{BC}| = \sqrt{3} \cdot |\dot{U}_A|$  й  $\alpha = 90^\circ - \varphi$ , те повна реактивна потужність трифазного кола буде дорівнює

$$P_{PE} = 3 \cdot (\dot{U}_A)_D (\dot{I}_A)_D \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot (\dot{U}_{BC})_D (\dot{I}_A)_D \cos \alpha$$

Аналогічні виводи справедливі й для інших варіантів схем включення ватметра, показаних на рис. 6.4

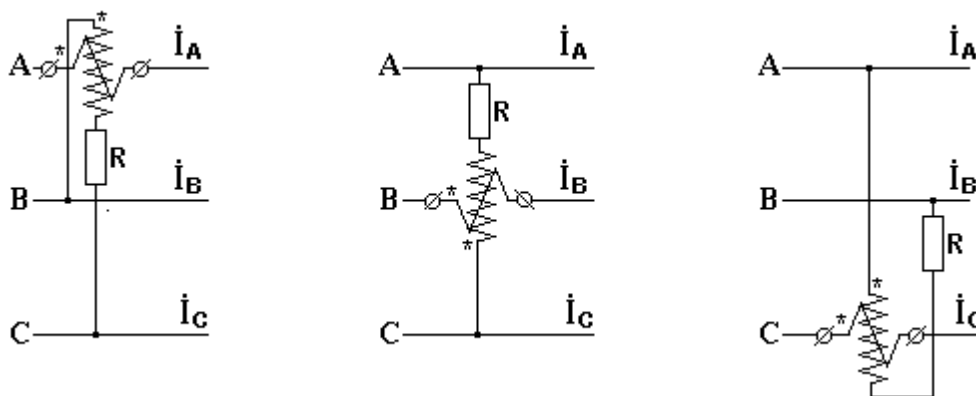


Рисунок 6.3 – Схеми включення одного приладу для вимірювання реактивної електричної потужності й енергії в симетричному трифазному колі

Це означає, що для одержання результату вимірювання реактивної потужності, що розсіюється симетричним трифазним колом, досить помножити показання ватметра, включеного по кожному з варіантів, показаних на рис. 6.3 на  $\sqrt{3}$ .

Точно такі ж виводи й рекомендації відносяться до схем включення лічильників електричної енергії й до одержання результату вимірювання реактивної електричної енергії, що розсіює симетричним трифазним колом.

Вимірювання активної електричної потужності й енергії в трифазному ланцюзі за допомогою двох приладів

Використовуються наступні співвідношення між лінійними струмами й напругами.

Нехай  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  - лінійні струми у фазах А, В, С відповідно, і  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  - лінійні напруги між відповідними фазами. Відомо, що  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$  й  $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$ . Потужність, виділювана, наприклад, у фазі А, дорівнює скалярному добутку векторів  $P_A = \dot{U}_A \dot{I}_A$ . Точно так само в інших фазах  $P_B = \dot{U}_B \dot{I}_B$  й  $P_C = \dot{U}_C \dot{I}_C$ . Сумарна потужність, споживана навантаженням, дорівнює  $P = \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B \dot{I}_B + \dot{U}_C \dot{I}_C$ . Але  $\dot{I}_C = -\dot{I}_A - \dot{I}_B$ . Тому

$$P = \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B \dot{I}_B - \dot{U}_C \dot{I}_A - \dot{U}_C \dot{I}_B = \dot{I}_A (\dot{U}_A - \dot{U}_C) + \dot{I}_B (\dot{U}_B - \dot{U}_C).$$

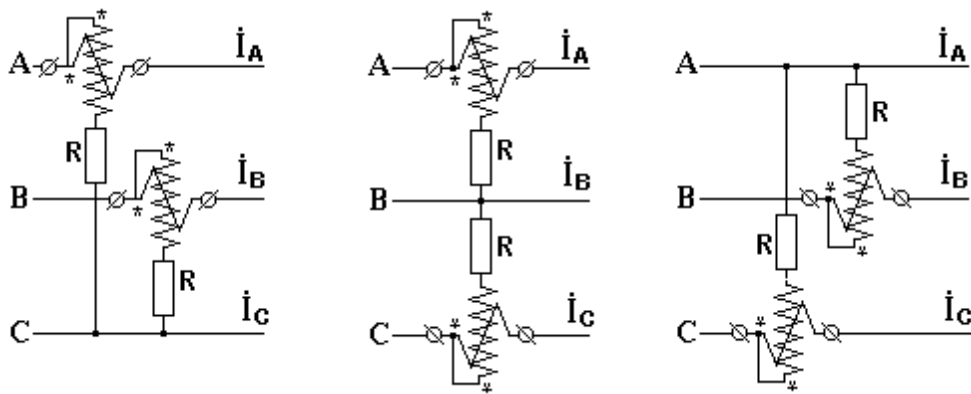


Рисунок 6.4– Варіанти включення двох ватметрів й (або) лічильників активної потужності й електричної енергії в трифазних колах

Різниці напруг  $\dot{U}_A - \dot{U}_C$  і  $\dot{U}_B - \dot{U}_C$  суть лінійні напруги  $\dot{U}_{AC}$  й  $\dot{U}_{BC}$  відповідно. У результаті одержуємо формулу

$$P = \dot{I}_A \dot{U}_{AC} + \dot{I}_B \dot{U}_{BC},$$

яка виправдує перший варіант схеми рис. 6.4 приєднання двох приладів до ліній трифазного кола з метою виміру повної активної електричної потужності або енергії, споживаною навантаженням. Ця потужність або енергія обчислюється, як сума показань двох приладів.

Аналогічним образом доводиться правомірність інших варіантів схем, які показані на тім же малюнку.

Розглянуті схеми реалізуються в трифазних лічильниках електричної енергії, у корпусі яких розміщені два механізми, показаних на рис. 6.4.


## Висновки

У промисловості вимірювання потужності та енергії дозволяє контролювати витрати енергії, підвищувати ефективність виробничих процесів, знижуючи втрати та оптимізуючи енергоспоживання.

Для побутових цілей вимірювання дозволяє розраховувати спожиту енергію, керувати витратами та знижувати споживання.


## Контрольні запитання до теми 6

1. Що таке активна, реактивна і повна потужність, і в яких одиницях вони вимірюються?
2. Як визначається активна потужність за допомогою формули?
3. У чому полягає різниця між активною і реактивною потужністю?
4. Що таке коефіцієнт потужності, і як його можна оптимізувати?
5. Як вимірюється електрична енергія і в яких одиницях вона представлена?

- 
6. Які основні типи приладів використовуються для вимірювання потужності та енергії?
  7. Як працює ватметр і які компоненти його конструкції?
  8. Чим механічні лічильники енергії відрізняються від електронних?
  9. У чому полягає метод прямого вимірювання потужності?
  10. Як за допомогою законів Кірхгофа та Ома проводиться опосередковане вимірювання потужності?
  11. Що таке цифрові методи вимірювання потужності, і які їх переваги?
  12. Як визначається потужність у трифазних колах за допомогою одного приладу?
  13. Як вимірюється реактивна потужність у трифазних симетричних колах?
  14. Які методи включення двох приладів використовуються для вимірювання потужності в трифазних системах?
  15. Як розраховується енергія в електричних колах на основі потужності?
  16. Що таке фактор потужності, і як зменшення реактивної складової впливає на ефективність системи?
  17. Які схеми включення використовуються для вимірювання потужності та енергії у схемі "зірка" і "трикутник"?
  18. Як вимірюються витрати енергії у промислових і побутових умовах?
  19. Які фактори можуть викликати похибки при вимірюванні потужності та енергії?
  20. У чому важливість контролю реактивних компонентів потужності для промислових систем?

### **Використана література до теми 6**

1. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
2. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Житомир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
3. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.

- 
4. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.
  5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
  6. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.
  7. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
  8. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: навчальний посібник. Київ: Знання-Прес, 2003. 180 с.

## ТЕМА 7. ВИМІРЮВАННЯ ІНДУКТИВНОСТІ ТА ЄМНОСТІ: ПРИНЦИПИ І МЕТОДИ

Основи вимірювання індуктивності і ємності. Прилади для вимірювання індуктивності. Метод резонансу для вимірювання ємності. Використання мостів для вимірювання індуктивності та ємності. Вплив частоти і температури на вимірювання індуктивності. Застосування ємнісних і індуктивних вимірювальних систем. Висновки.

### 7.1 Основні поняття

Індуктивність — це здатність провідника, або індуктивного елемента, протистояти змінам електричного струму через створення електромагнітного поля. Основною одиницею вимірювання індуктивності є генрі (Гн).

Ємність — це здатність системи (конденсатора) накопичувати електричний заряд при створенні електричного поля. Основною одиницею ємності є фарад (Ф).

При дослідженні комплексних опорів в колах змінного струму вимірюваними величинами є ємність, індуктивність  $L$ , активний опір  $R$ , а також тангенс кута діелектричних втрат конденсатора  $\operatorname{tg}\delta$ , добротність котушки індуктивності  $Q$  і стала часу резистора  $\tau$ .

Чисто ємнісних і чисто індуктивних приймачів не існує, обов'язково існує ще й активний опір. Тоді комплексний опір подають еквівалентною схемою заміщення: або послідовною або паралельною.

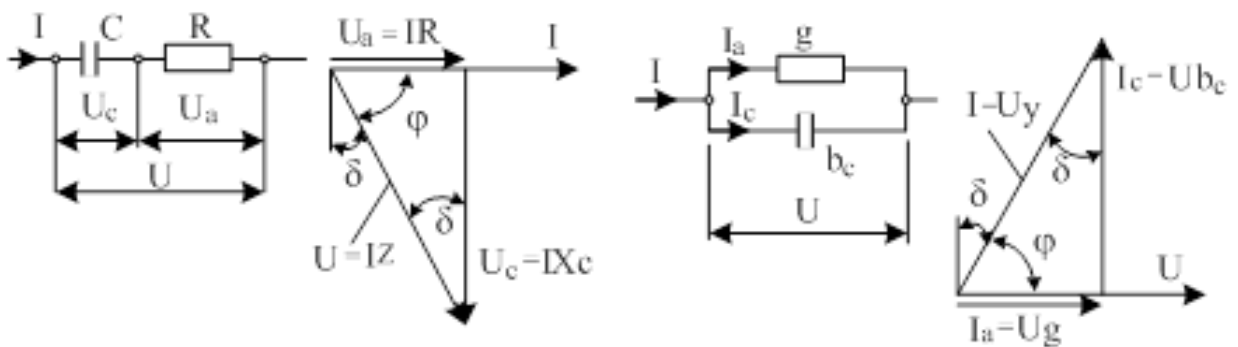


Рисунок 7.1 - Еквівалентні схеми заміщення і векторні діаграми конденсатора: а, б – послідовна, в, г – паралельна.

Струм, що споживає конденсатор, випереджує напругу не на 90, а на кут  $\varphi$ , що різниця  $\delta = 90 - \varphi$  називається кутом діелектричних втрат. Тому конденсатори характеризуються двома параметрами: ємністю  $C$  і тангенсом кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg}\sigma$ . З векторної діаграми для першого і другого випадку:

$$\operatorname{tg}\sigma = \frac{U_a}{U_c} = \frac{IR}{LX_c} = R\omega C$$

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{I_a}{I_c} = \frac{U_g}{(U b_c)} = \frac{1}{R \omega C}$$

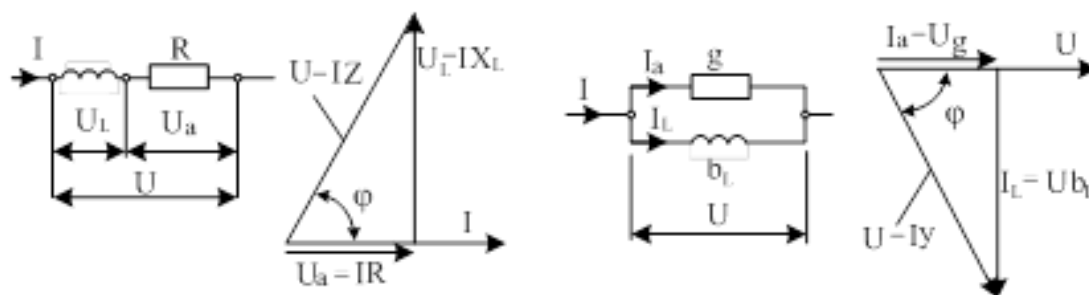


Рисунок 7.2 - Еквівалентні схеми заміщення і векторні діаграми котушки: а, б – послідовна, в, г – паралельна

При вимірювання котушок виділяють параметри: значення індуктивності  $L$  і опору  $R$  або частіше добротність  $Q$ .

Для послідовної схеми:  $Q = \frac{\omega L}{R}$  (відношення індуктивного опору котушки до активного).

Для паралельної:  $Q = \frac{b_L}{g}$ .

## 7.2 Методи вимірювання індуктивності та ємності

Методи вимірювання індуктивності та ємності можна розділити на:

**Місткові методи:** Використовуються вимірювальні схеми на основі мостів Вітстона, що дозволяють точно визначити значення індуктивності чи ємності за допомогою балансу схеми.

**Резонансні методи:** Застосовуються для вимірювання індуктивності та ємності, ґрунтуючись на резонансних частотах коливальних контурів. Цей метод підходить для точного визначення параметрів елементів.

**Методи перетворення:** Передбачають перетворення індуктивності або ємності в іншу величину, наприклад, напругу або струм, що можна легше виміряти. Сюди входять методи із застосуванням генераторів сигналів.

## 7.3 Місткові методи

**Міст змінного струму:** Найбільш часто використовується для вимірювання індуктивності та ємності. Використовує принцип балансу напруг у мостовій схемі для точного визначення невідомих значень індуктивності або ємності. Прикладом може бути міст Вітстона, модифікований для змінного струму.

Найпоширеніші – мости з чотирма плечами рис. 7.3.

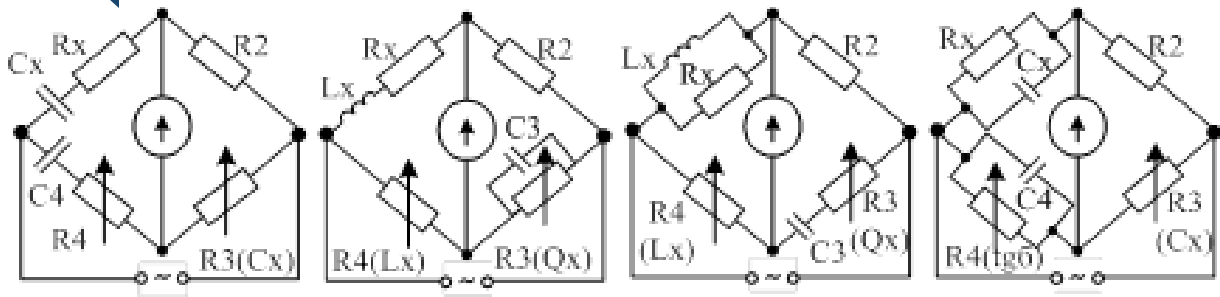


Рисунок 7.3 – Мостові схеми змінного струму

Умова рівноваги :  $z_1z_3 = z_2z_4$ .  $z = Ze^{j\varphi}$ .

При цьому необхідно враховувати співвідношення характеру (ємнісного активного чи індуктивного) і фазових зсувів елементів окремих плеч  $\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4$ . Для цього необхідно змінювати по черзі значення двох регульовальних елементів плеч моста – активного і реактивного опорів

**Міст Шерінга:** Спеціально розроблений для вимірювання ємності та втрат у діелектриках. Він застосовується в ситуаціях, де потрібно вимірювати ємність з високою точністю.

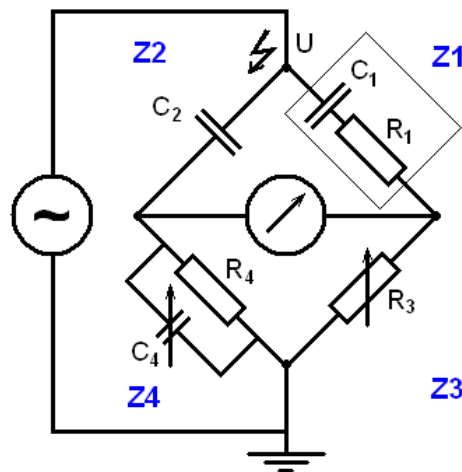



Рисунок 7.4 - Міст Шерінга.  $C_1$  - досліджуваний конденсатор,  $R_1$ - послідовний опір в еквівалентній схемі досліджуваного конденсатора,  $C_2$ - еталонний конденсатор,  $R_3$  - безіндукційний резистор,  $C_4$  - змінний конденсатор,  $R_4$ - змінний безіндукційний резистор .

Схеми включення

Залежно від положення об'єкта, що вимірюється, у схемі різняться:

- нормальна або пряма схема;
- перевернута схема.

При нормальній схемі на об'єкт вимірювання підводиться випробувальна напруга, при перевернутій схемі об'єкт заземляється.



Нормальна є точнішою, тому перевернуту схему застосовують лише при заземленому об'єкті та неможливості його ізоляції від кіл «землі».

#### Застосування

Основним методом дослідження діелектричних властивостей діелектриків у високовольтному обладнанні електропостачання як твердих (ізолювані вводи, тяги, ізолятори), так і рідких (трансформаторної олії) є вимірювання параметра діелектричних втрат - тангенс дельта  $tg(\delta)$ .

Діелектрик, що знаходиться в змінному електричному полі, через свою не ідеальність поглинає деяку кількість енергії, що виділяється у вигляді тепла. Потужність, що виділяється у вигляді тепла - це активна потужність, яка визначає діелектричні втрати в ізоляції. Безпосередній вимір цих втрат дуже утруднено, тому об'єкт, що вимірюється, представляють еквівалентно у вигляді паралельного або послідовного з'єднання ідеального конденсатора без втрат і активного опору, яке і характеризує втрати в об'єкті. При цьому треба враховувати, що великі об'єкти можуть мати більші діелектричні втрати, тому для практики необхідно знати не абсолютну величину втрат, але у співвідношенні з їх габаритами, тому вводиться параметр:

$$tg \delta = \frac{P}{\omega \cdot C \cdot U^2}$$

де - Потужність діелектричних втрат, - кругова частота, - напруги

Ця формула випливає з розгляду прямокутного векторного трикутника струмів, де один з катетів - ємнісний струм, інший - активний струм, гіпотенуза - сумарний струм, а кут  $\delta$ , що протилежить катету активного струму і є додатковим кутом  $\varphi$  (кут між повним струмом і напругою його значення  $\cos\varphi$  називається коефіцієнтом потужності). Звідси випливає, що величина  $tg \delta$  не залежить від габаритів обладнання (зі збільшенням габаритів обладнання приблизно однаково збільшуються діелектричні втрати та ємність).

Розмір  $tg \delta$  вимірюється у відсотках. На величину  $tg \delta$  впливає температура ізоляції і величина напруги, що прикладається до неї, тому вимірювання проводять при деякому обумовленому напрузі, наприклад, 10 кВ і в заданому інтервалі температур, зазвичай 10-30 °С.

Іноді виміри роблять при зниженій напрузі. Вимірювання  $tg\delta$  згідно з ПУЕ необхідно проводити:

- у трансформаторів струму 110 кВ та вище;
- для конденсаторів зв'язку, відбору потужності та ділильних;
- у вводів вимикачів та трансформаторів, а також прохідних ізоляторів з внутрішньою основною маслобар'єрною, паперово - масляною та бакелітовою ізоляцією;
- силових масляних трансформаторів, автотрансформаторів;

- проби трансформаторної олії перед заливкою, в процесі експлуатації та перед включенням нового обладнання - силових оливнонаповнених трансформаторів, вимірвальних оливнонаповнених трансформаторів, оливнонаповнених вводів.

За допомогою мосту Шерінга виробляють також лабораторні вимірювання тангенсу дельта та ємності зразків ізоляції.

**Міст Максвелла:** Використовується для вимірювання індуктивності за допомогою зрівноваження з відомими ємнісними елементами. Це дозволяє визначати індуктивність з високою точністю.

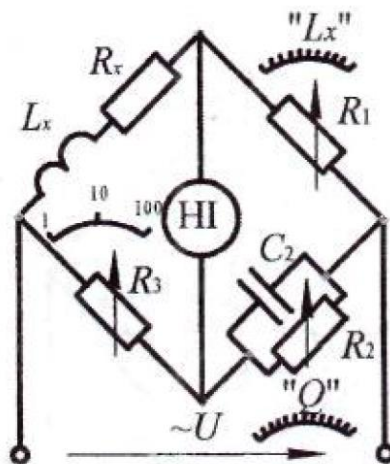


Рисунок 7.5 - Схема мосту Максвелла змінного струму для вимірювання індуктивності

Розрахункові формули


$$L_x = C_2 \cdot R_1 \cdot R_3;$$

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}.$$

При незмінних значеннях  $C_2$ ,  $R_3$  міст урівноважується зміною опорів резисторів  $R_1$  і  $R_2$ . Резистор  $R_1$  градуюють в одиницях індуктивності, а резистор  $R_2$  – в значеннях добротності. В практичних схемах дискретною зміною опорів  $R_3$  розширюються межі вимірювань в 10, 100 і більше разів. Недоліком мосту є погана збіжність при малих значеннях добротності (при  $Q < 1$ ) при  $Q > 30$  конденсатор приєднується послідовно.

Особливості моста Максвелла

Висока точність: Міст Максвелла забезпечує високу точність вимірювання індуктивності, особливо для котушок і індуктивних елементів із малими втратами.



Чутливість до частоти: Цей міст застосовується на низьких і середніх частотах; на дуже високих частотах він стає менш ефективним через втрати в діелектриках конденсаторів.

Простота налаштування: Використання стандартного конденсатора і резистора дає змогу легко налаштувати міст для досягнення балансу.

Застосування моста Максвелла

Вимірювання індуктивності котушок: Ідеальний для точного вимірювання індуктивності котушок у промислових і лабораторних умовах.

Аналіз параметрів індуктивних компонентів: Міст Максвелла дозволяє визначати як індуктивність, так і активний опір котушок.

Калібрування приладів: Завдяки точності і стабільності, міст Максвелла широко використовується для калібрування індуктивних датчиків та інших пристроїв, що вимагають вимірювання індуктивності.

Міст Максвелла є одним з найбільш ефективних і точних інструментів для вимірювання індуктивності в практиці, забезпечуючи стабільні результати завдяки простоті налаштування та використанню добре контрольованих елементів

## 7.4 Резонансні методи

Послідовний та паралельний резонанс: Коли індуктивний елемент і конденсатор з'єднані у контурі, то на певній частоті система входить в резонанс. Вимірюючи частоту резонансу, можна обчислити індуктивність чи ємність за відомим значенням іншого елемента.

Резонансний метод вимірювання параметрів електричних кіл базується на реалізації відомої залежності власної частоти коливального контуру від значень його параметрів

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}}$$

Знаючи резонансну частоту контуру  $f_p$  і один його параметр ( $L$  або  $C$ ), можна визначити інший параметр. Резонансний метод застосовується для вимірювання індуктивності, ємності, добротності котушок індуктивностей і коливальних контурів в діапазоні частот від десятків кілогерц до 3000 МГц. Часто резонансний метод застосовують у поєднанні з методом заміщення, що дозволяє підвищити точність результату вимірювання. Застосування резонансного методу виправдано на високих частотах. На низьких частотах резонансні явища виражені менш різко, внаслідок чого точність вимірювання стає недостатньою для практичних цілей.

У найпростішому випадку вимірювальна схема складається з вимірювального генератора високої частоти ГВЧ, коливального контуру (індуктивності  $L_0$  та ємності  $C_x$ ) і електронного вольтметра  $V$  (рис. 7.5). Схему

настроюють у резонанс змінюванням частоти  $f_p$  генератора, про що судять за максимальним показанням вольтметра. Значення ємності обчислюють за формулою

$$C_x = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_p^2 \cdot L_0}$$

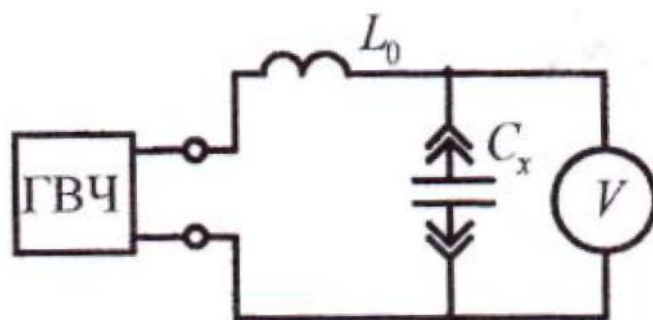


Рисунок 7.6 - – Найпростіша схема для вимірювання ємності резонансним методом

Цей спосіб простий, але не забезпечує високої точності. Більшої точності можна досягти, скориставшись поєднанням резонансного методу з методом заміщення. Для вимірювання малих значень ємності збирається схема за рис. 7.7, а; для вимірювання великих значень ємності – схема за рис. 7.7, б. Метод передбачає виконання двох вимірювань. Перше вимірювання виконується так: встановлюють потрібне значення частоти генератора і при відсутності вимірюваної ємності  $C_x$  настроюють схему в резонанс змінюванням ємності  $C_0$ . Настроювання схеми в резонанс визначають за максимальними показаннями вольтметра і фіксують значення ємності  $C_{01}$ .

Потім конденсатор малої ємності підключається паралельно ємності  $C_0$ , а конденсатор великої ємності – послідовно з ємністю  $C_0$ . Змінюванням ємності  $C_0$  до значення  $C_{02}$  настроюють схему в резонанс.

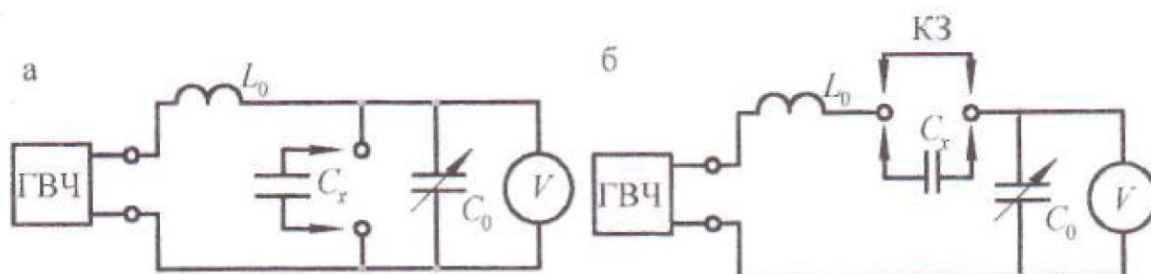


Рисунок 7.7 – Схеми вимірювання ємності резонансним методом у поєднанні з методом заміщення

Вимірювальна мала ємність обчислюється за формулою

$$C_x = C_{01} - C_{02},$$

а велика за формулою

$$C_x = \frac{C_{01} \cdot C_{02}}{C_{01} - C_{02}}.$$

Похибка вимірювання визначається в основному похибками відліку по шкалі робочого конденсатора  $C_0$ , а також похибками відтворення значень ємностей  $C_{01}$  і  $C_{02}$ .

## 7.5 Вимірювання індуктивності

Вимірювання індуктивностей методом зміщення виконується так. Мала індуктивність  $L_x$  вмикається послідовно зі зразковою індуктивністю  $L_0$  (рис. 7.8, а), а велика індуктивність – паралельно конденсатору  $C_0$  (рис. 7.8, б).

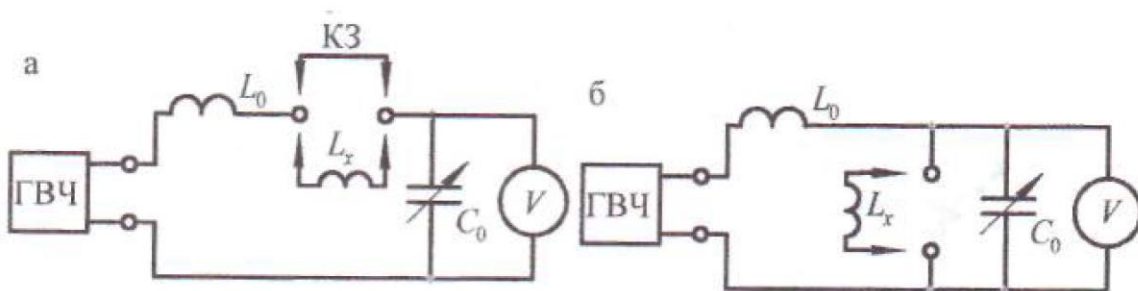


Рисунок 7.8 – Схеми для вимірювання індуктивності резонансним методом у поєднанні методом заміщення

В обох випадках проводять два експерименти. Перш за все встановлюють потрібну частоту генератора і при відключеній індуктивності  $L_x$  настраюють схему в резонанс змінюванням ємності  $C_0$ . Момент резонансу в схемі визначають за максимальним показанням вольтметра. При резонансі

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_0 \cdot C_{01}}}$$

Потім підключають малу індуктивність і зміною ємності  $C_0$  (при незмінній частоті генератора) знову досягають резонансу в схемі. При цьому те саме значення резонансної частоти визначається іншими значеннями параметрів контуру

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{(L_0 + L_x) \cdot C_{02}}}$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь, знайдемо значення вимірюваної індуктивності

$$L_x = L_0 \cdot \left( \frac{C_{01}}{C_{02}} - 1 \right).$$

Аналогічно роблять при вимірюванні великого значення індуктивності.

Після підключення її до схеми (рис. 7.8, б) і настроювання контуру в резонанс змінюванням ємності  $C_0$  одержують те саме значення резонансної частоти

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{\frac{C_{02} \cdot L_0 \cdot L_x}{L_0 + L_x}}}$$

$$L_x = L_0 \cdot \frac{C_{01}}{C_{02} - C_{01}}.$$

**Метод вимірювання Q-фактору:** Параметр Q використовується для визначення якості індуктивних елементів, адже він вказує на рівень втрат у контурі. Q-фактор вимірюється як відношення енергії, запасеної в елементі, до втрат за період.

**Q-фактор (коефіцієнт якості)** індуктивного або ємнісного елемента характеризує рівень втрат енергії в елементі. В електроніці і радіотехніці Q-фактор вказує на ефективність збереження енергії елементом у порівнянні з енергією, що втрачається на протязі одного циклу коливань. Чим вище Q-фактор, тим менші втрати і тим вища якість елемента.

Q-фактор визначається як відношення енергії, запасеної в елементі, до енергії, втраченої за один період коливань. Формально він розраховується так:

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{Енергія, запасена в контурі}}{\text{Енергія, втрачена за період}}$$


Формули для Q-фактору

Для різних типів контурів і елементів Q-фактор визначається по-різному:

Для індуктивного елемента:

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

де  $\omega$  — кутова частота ( $\omega = 2\pi f$ , де  $f$  — частота),  
L — індуктивність,



R — активний опір.  
Для ємнісного елемента:

$$Q = \omega R C$$

де C — ємність,  
R — активний опір у паралельній схемі з ємністю.

### Методи вимірювання Q-фактору

Існують кілька методів вимірювання Q-фактору, залежно від конкретного елемента і бажаної точності.

#### Резонансний метод

Цей метод використовується для вимірювання Q-фактору коливального контуру, що складається з індуктивного та ємнісного елементів. У резонансному контурі Q-фактор можна обчислити за резонансною кривою.

#### Процедура вимірювання:

- Встановлюється коливальний контур з індуктивністю  $L$  і ємністю  $C$ .
- Підключається змінне джерело живлення, і контур доводиться до резонансу (при частоті, де індуктивний і ємнісний опір дорівнюють).
- На резонансній частоті  $f_0$  записується максимальна амплітуда напруги.
- Вимірюються частоти на рівні половини потужності  $f_1$  і  $f_2$ , де амплітуда знижується до  $1/\sqrt{2}$  від максимальної.

Q-фактор розраховується за формулою:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

де  $f_0$  — резонансна частота, а  $f_1$  та  $f_2$  — частоти на рівні половини потужності.

### Метод вимірювання затухання


Цей метод ґрунтується на тому, що контур з високим Q-фактором має мале затухання. Метод підходить для визначення Q-фактору в контурі з вільними коливаннями.

#### Процедура вимірювання:

- Контур приводиться до резонансу, після чого джерело відключається, залишаючи контур у стані вільних коливань.
- Спостерігається затухання сигналу (амплітуди) з часом, а саме кількість періодів, за які амплітуда зменшується.

Q-фактор можна обчислити як:

$$Q = \frac{\pi \cdot N}{\ln(A_1/A_2)}$$



де  $N$  — кількість періодів, за які амплітуда зменшується до певного значення,

$A_1$  і  $A_2$  — початкова і кінцева амплітуди відповідно.

### **Використання Q-метра**

**Q-метр** — це спеціалізований прилад для вимірювання Q-фактору індуктивних і ємнісних елементів.

Процедура вимірювання:

- Індуктивність або ємність підключається до Q-метра.
- Прилад генерує змінний струм і вимірює реактивний опір на певній частоті.
- Q-метр автоматично обчислює та відображає значення Q-фактору, зазвичай також дозволяючи регулювати частоту для більш точного вимірювання.

### **Імпедансний метод**

Цей метод ґрунтується на вимірюванні імпедансу індуктивного або ємнісного елемента. При відомій частоті змінного струму Q-фактор можна визначити як:

$$Q = \frac{|Z|}{R}$$

де  $|Z|$  — модуль імпедансу елемента,

$R$  — активна складова імпедансу.

### **Застосування Q-фактору**

- **Оцінка якості індуктивних і ємнісних елементів:** Високий Q-фактор означає низькі втрати і високу якість компонента.
- **Проектування резонансних контурів:** Q-фактор визначає ширину смуги пропускання і добротність коливальних контурів.
- **Високочастотна техніка:** Вимірювання Q-фактору важливе в антенах, фільтрах та підсилювачах, особливо в радіочастотних пристроях.

Q-фактор є критичним параметром у високочастотній техніці та електроніці, оскільки він дозволяє оцінювати ефективність і якість електронних компонентів та систем.

### **Методи перетворення**

Методи з генерацією змінного сигналу: В цих методах індуктивність або ємність перетворюється в частоту або амплітуду змінного сигналу, що дозволяє використовувати стандартні вимірювальні прилади.

Імпульсні методи: При використанні імпульсного сигналу можна оцінити індуктивність або ємність за часом заряду чи розряду конденсатора або котушки.

LCR-метри: Сучасні цифрові LCR-метри дозволяють швидко та точно виміряти індуктивність, ємність і опір елементів, використовуючи комбінацію різних методів, як місткових, так і резонансних.

## 7.6 Приклади практичного використання

Вимірювання індуктивності котушки: Для вимірювання індуктивності котушки можна використовувати міст Максвелла або серійний резонанс. Це забезпечить високу точність вимірювання для котушок з різними параметрами.

Вимірювання ємності конденсатора: Використання моста Шеринга або сучасного LCR-метра дозволяє точно виміряти ємність навіть при наявності втрат у діелектриках.


Контроль якості компонентів: Резонансні методи дозволяють перевіряти параметри індуктивності та ємності, особливо для високочастотних компонентів, де параметри мають вирішальне значення для роботи схем.

### Висновки

Вимірювання індуктивності та ємності є важливою частиною розробки та контролю якості електронних компонентів. Сучасні методи, як-от місткові схеми, резонансні та методи перетворення, забезпечують високоточне вимірювання для широкого спектру додатків. Використання цих методів у поєднанні з сучасними приладами, такими як LCR-метри, забезпечує необхідну точність для інженерної практики.

### Контрольні запитання до теми 7

1. Що таке індуктивність і ємність, і в яких одиницях вони вимірюються?
2. Як визначаються активний опір і тангенс кута діелектричних втрат у комплексних колах?
3. Які основні методи використовуються для вимірювання індуктивності та ємності?
4. Як працюють місткові методи вимірювання індуктивності та ємності?
5. Що таке міст Шеринга, і для яких цілей він використовується?
6. У чому особливості моста Максвелла і для яких елементів він застосовується?
7. Як резонансний метод допомагає визначити параметри індуктивності та ємності?
8. Що таке метод перетворення, і як він використовується для вимірювання індуктивності або ємності?
9. Як частота змінного струму впливає на точність вимірювання індуктивності та ємності?
10. Які пристрої, як-от LCR-метри, застосовуються для сучасних вимірювань індуктивності та ємності?
11. Як параметр  $Q$  використовується для оцінки якості індуктивних та ємнісних елементів?
12. Як метод заміщення підвищує точність резонансного методу?

- 
13. У яких випадках використовуються методи з генерацією змінного сигналу для оцінки параметрів елементів?
  14. Як контролюються діелектричні втрати в ізоляційних матеріалах за допомогою тангенсу кута  $\delta$ ?
  15. Які параметри необхідно враховувати при вимірюванні великих об'єктів з діелектричними властивостями?
  16. Як вимірюється ємність конденсаторів з високою точністю?
  17. Чим відрізняються резонансні методи від мостових у застосуванні?
  18. Які типи похибок можуть виникати під час вимірювань індуктивності та ємності?
  19. Як використовуються імпульсні методи для визначення індуктивності та ємності?
  20. Яке практичне застосування вимірювань індуктивності та ємності у промислових і лабораторних умовах?

### **Використана література до теми 7**

1. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
2. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Житомир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
3. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
4. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.
5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
6. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.
7. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
8. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: навчальний посібник. Київ: Знання-Прес, 2003. 180 с.

## ТЕМА 8. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА ФАЗОВОГО ЗСУВУ

Основи вимірювання частоти та принципи її обчислення. Використання частотомірів та осцилографів. Принципи вимірювання фазового зсуву між сигналами. Особливості роботи осцилографів при вимірюванні фази. Використання фазометрів та їх характеристики. Похибки у вимірюванні частоти та фази та їх оцінка. Висновки

Широкий діапазон частот електричних сигналів від часток герца до десятків гігагерц, різні вимоги до точності їх вимірювання зумовили велику різноманітність методів вимірювання частоти. Для вимірювань та контролю частоти в промислових умовах в діапазоні від 20 до 2500Гц з порівняно невисокою точністю (1 ...4%) використовують електромеханічні частотоміри на базі логометрів електромагнітної, електро- чи феродинамічної систем.

На рис.8.1 наведена спрощена схема електродинамічного частото-міра.

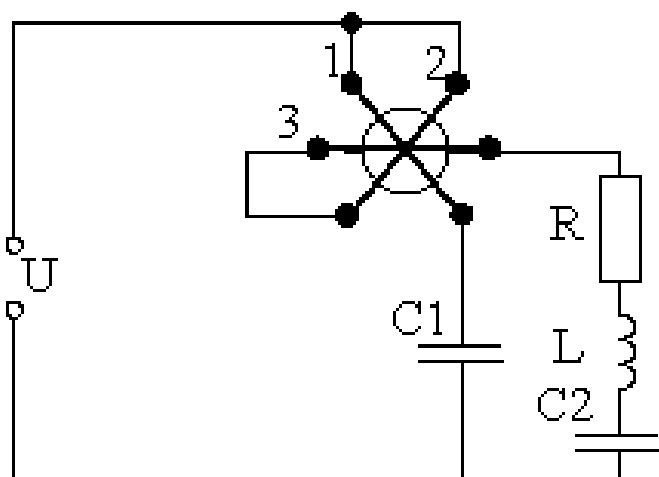


Рисунок 8.1 - Спрощена схема електродинамічного частотоміра.

Наявність в колі рухомих рамок 1 і 2 та нерухомих котушки 3, частотозалежних конденсаторів C1, C2 та індуктивності L забезпечує однозначну залежність відхилення рухомої частини логометра від частоти:

$$\alpha = F \left( \frac{I_1}{I_2} \right) = F \left[ \frac{\omega_x L - \frac{1}{(\omega_x C_2)}}{\frac{1}{(\omega_x C_1)}} \right] = F(f_x)$$

**Непрямий метод:** Вимірювання здійснюється за допомогою конденсатора з відомою ємністю  $C_0$  (або котушки відомої індуктивності), амперметра і вольтметра. Тоді значення частоти може бути визначене за формулою:

$$f = I / 2\pi C_0 U_C, \quad f = U_L / 2\pi I L_0$$

**За допомогою фігур Ліссажу:** На вхід X подають напругу досліджуваної частоти, на вхід Y – відомої зразкової частоти  $f_0$ . Отриману фігуру Ліссажу уявно перетинають вертикальною і горизонтальною лініями, що не повинні проходити через точки перетину самої фігури. Рахують скільки

разів осі перетнули фігуру  $n_x$  та  $n_y$ . Відношення  $n_x$  до  $n_y$  рівне відношенню частот. Отже:  $f_x = \frac{f_0 n_x}{n_y}$ .

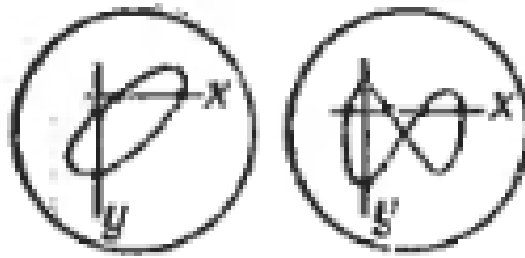


Рисунок 8.2 - Види фігур Ліссажу

**За лінійною розгорткою** сигналу на екрані осцилографа: частоту визначаємо як величину зворотню періоду досліджуваного сигналу:  $f=1/T$ .

**Резонансний метод** базується на порівнянні вимірюваної частоти з частотою коливань коливної ланки. Застосовується цей метод при вимірюванні частоти від сотень кГц до сотень ТГц. Основним вузлом резонансного частотоміра є коливна система у вигляді резонансного контуру із зосередженими реактивними елементами чи вузлами з розподіленими параметрами - відрізками коаксіальних чи смугових ліній, або ж об'ємні резонатори (для частот у десятки ТГц).

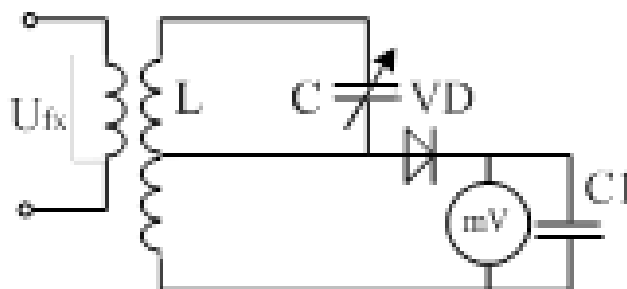


Рисунок 8.3 - Схема резонансного частотоміра з коливною системою у вигляді контуру із зосередженими LC-параметра

На рис.8.3 зображена схема резонансного частотоміра з коливною системою у вигляді контуру із зосередженими LC-параметрами. Вимірювальний LC-контур має індуктивний зв'язок з колом досліджуваного сигналу  $U$  та автотрансформаторний зв'язок з колом індикатора. Регулюванням ємності  $C$  конденсатора змінної ємності настраюють частоту  $f_0$  власних коливань LC-контуру в резонанс з вимірюваною частотою  $f_x$ :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi LC} = f_x.$$

При цьому напруга в індикаторному колі зростає до максимального значення, що фіксується вихідним індикаторним пристроєм  $mV$ , а значення вимірюваної частоти визначають за показами конденсатора змінної ємності. Похибка таких частотомірів звичайно не менше ніж 1%.

Найвищу точність вимірювання в діапазоні від часток герца до сотень мегагерц забезпечують **цифрові частотоміри**. Залежно від способу утворення інтервалу усереднення (часу) розрізняють частотоміри прямої лічби та обчислювальні.

Перші з них будуються на основі аналого-цифрової структури хронометра, в якому протягом точно відомого інтервалу часу  $T_0$  підраховується кількість імпульсів невідомої частоти.

Похибка вимірювання частотомірів прямої лічби визначається головним чином похибкою від нестабільності так званої бази часу, тобто набору сигналів каліброваних міток часу, завдяки яким вибирається тривалість часу вимірювання  $T_0$ , та похибкою квантування  $\delta_{кв}$ :

$$\delta_{ч} = \pm \left( \delta_{бч} + \frac{1}{f_x T_0} \right)$$

В обчислювальних частотомірах, завдяки вибору практично сталого часу вимірювання та використанню циклічного перетворення вхідного сигналу, забезпечується майже однакова похибка вимірювання (соті частки відсотка) у всьому діапазоні частот

Принцип дії обчислювального частотоміра за методом подвійного збігу показано на рис.8.4.

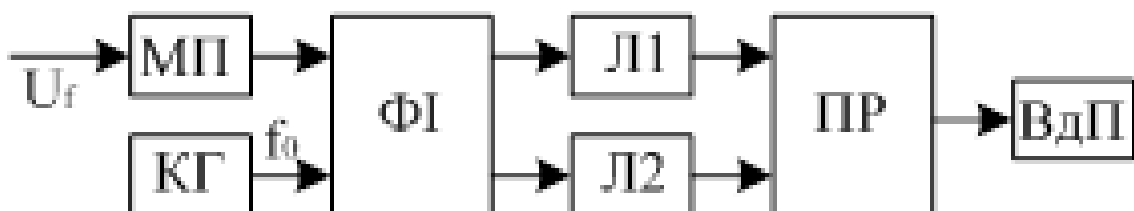


Рисунок 8.4 - Принцип дії обчислювального частотоміра за методом подвійного збігу

Відповідно до спрощеної структурної схеми цього частотоміра вхідна напруга вимірюваної частоти  $f_x$  нормується вхідним масштабуючим пристроєм МП до номінального рівня, зручного для подальшого опрацювання. У формувачі інтервалів ФІ задається строб-імпульс вимірювання з тривалістю  $T_{вим}$ , що встановлюється залежно від  $f_x$ . З виходу формувача імпульсів ФІ на перший лічильник ЛІ частотоміра надходить певна послідовність імпульсів кількістю  $N_1$ , яка дорівнює кількості повних періодів вхідного сигналу, синхронізованого з переднім та заднім фронтами строб-імпульса  $T_{вим}$ :  $N_1 = T_{вим} f_x$ . Одночасно, починаючи з переднього фронту

Твим за допомогою другого лічильника Л2 визначається  $N_1 = T_{\text{вим}} f_0$  - кількість імпульсів базової частоти від кварцового генератора КГ . Мірою вимірюваної частоти буде відношення

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{T_{\text{вим}} f_x}{f_0} = \frac{f_x}{f_0}$$

Що визначається процесором ПР і фіксується відліковим пристроєм ВдП.

При вимірюванні низьких частот (до 1 Гц і нижче) інтервал  $T_{\text{вим}}$  вибирають таким, що дорівнює одному періоду повторення  $T_x = \frac{1}{f_x}$  .

Вибираючи значення  $f_0$  близьким до верхньої частоти діапазону вимірювання, отримують сталі значення похибки квантування,  $\sigma_{\text{кв}} = \frac{1}{f_0 T_{\text{вим}}}$  .

Безпосередньо фазовий зсув між напругою і струмом навантаження можна за допомогою електродинамічних і феродинамічних фазометрів. В логометрах ЕД системи нерухома котушка ввімкнена послідовно з навантаженням, а рухомі – паралельно до навантаження так що струм в одній з них відстає від напруги на кут  $\beta_1$  для чого послідовно ввімкнене активно-індуктивне навантаження; а струм другої котушки випереджує напругу на кут  $\beta_2$ , для чого до неї послідовно ввімкнено активно-ємнісне навантаження. При чому  $\beta_1 + \beta_2 = 90$ , і  $|I_1| = |I_2|$  . Кут відхилення приладу залежить від  $\cos\phi$  .

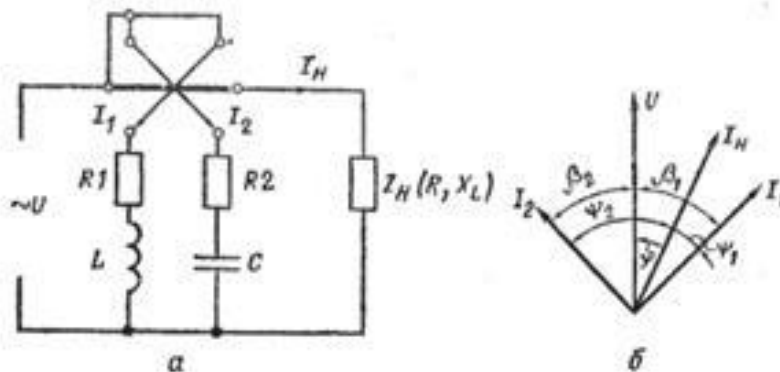


Рисунок 8.5 - Схема фазометра і векторна діаграма струмів і напруг.

В цифрових фазометрах прямого перетворення для вимірювання фазового зсуву його перетворюють в інтервал часу. Досліджувані напруги подають на два входи приладу, і на відліковому пристрої знімають показ числа імпульсів, за один період досліджуваних напруг, що відповідає фазовому зсуву в градусах.

Фазовий зсув між двома періодичними напругами можна виміряти за допомогою електронно-променевого осцилографа.

1) Метод еліпса. На входи X і Y подають досліджувані сигнали  $U_1$  та  $U_2$ .

Регулюють підсилення X і Y так, що повні відхилення по осях були рівні:  $X_m = Y_m$ . На екрані отримуємо зображення еліпса, тоді фазовий зсув:  $\sin \varphi_x = \frac{X}{X_m}$ .

Похибка 1..2%.

2) По фігурах Ліссажу. (якщо відношення частот виражається раціональним числом) рис.8.6.

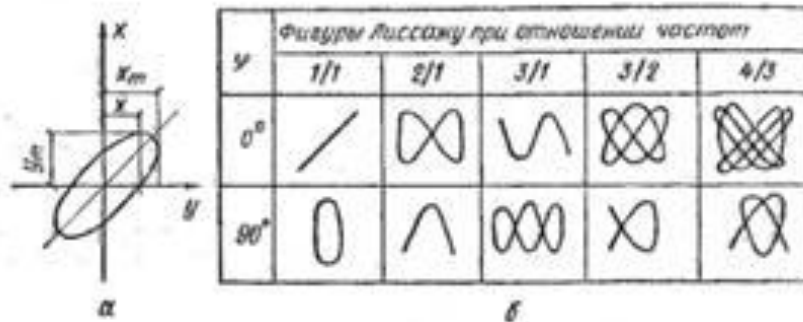


Рисунок 8.6 - Визначення фазового зсуву між двома періодичними напругами по фігурах Ліссажу

3) методом лінійної розгортки за допомогою двопробеневого осцилографа рис. 8.7. Для цього на екрані встановлюють нерухомі осцилограми обох напруг. Якщо виміряти відрізки  $ab$  і  $ac$ , що відповідають часу  $t_\phi$  і  $T$ , то значення фази:  $\varphi_x = \frac{l_{ab}360}{l_{ac}}$ .

Похибка методу визначається неточністю вимірювання  $ab$  і  $ac$ .

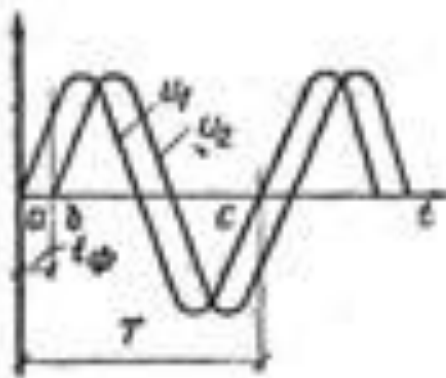


Рисунок 8.7 - Визначення фазового зсуву між двома періодичними напругами методом лінійної розгортки

## Висновки

Завдяки широкому діапазону частот (від часток герца до сотень гігагерц) та вимогам до точності існує велика кількість методів вимірювання, серед яких резонансний, Ліссажу, осцилографічний та цифровий.

Особливості вимірювання частоти: Прямі методи забезпечують високу точність для широкого діапазону частот, особливо у цифрових частотомірах.

Непрямі методи базуються на використанні відомих параметрів, таких як ємність або індуктивність, для розрахунку частоти.

Точність цифрових приладів: Цифрові частотоміри дозволяють досягти високої точності за рахунок мінімізації похибок квантування та стабільної бази часу. Вони є основним інструментом для вимірювань частот у промисловості та дослідженнях.


Методи вимірювання фазового зсуву: Фазометри (електродинамічні, феродинамічні та цифрові) дозволяють безпосередньо визначати фазовий зсув між сигналами. Електронно-променеві осцилографи дають можливість візуалізувати фазовий зсув за допомогою методів еліпсів або фігур Ліссажу, а також вимірювати його через лінійну розгортку.

Основні похибки: Вимірювання частоти та фази супроводжуються похибками, пов'язаними із нестабільністю бази часу, обмеженою роздільною здатністю та впливом зовнішніх факторів, які можна мінімізувати через відповідний вибір приладів і методів.

Застосування в практиці: Вимірювання частоти і фазового зсуву є критичними для налаштування та аналізу роботи електричних систем, що працюють на різних частотах, зокрема в енергетиці, телекомунікаціях та електроніці.

## Контрольні запитання до теми 8

1. Що таке частота і фазовий зсув, і як вони визначаються?
2. Які методи вимірювання частоти існують, і які з них найбільш точні?
3. Як працює електромеханічний частотомір і для яких частот він використовується?
4. У чому полягає принцип роботи резонансного частотоміра?
5. Як цифрові частотоміри забезпечують високу точність вимірювань?
6. Що таке метод фігур Ліссажу, і як він використовується для визначення частоти?
7. Як за допомогою осцилографа можна виміряти частоту сигналу?
8. У яких випадках використовується непрямий метод вимірювання частоти, і які прилади при цьому застосовуються?
9. Що таке фазометр, і які типи фазометрів існують?
10. Як фазовий зсув вимірюється за допомогою електродинамічних і феродинамічних фазометрів?

- 
11. Як працює цифровий фазометр, і як у ньому перетворюється фазовий зсув у часовий інтервал?
  12. Що таке метод еліпса, і як він застосовується для вимірювання фазового зсуву?
  13. Як метод фігур Ліссажу може бути використаний для вимірювання фазового зсуву?
  14. Які особливості методу лінійної розгортки для визначення фазового зсуву?
  15. Як визначають похибки у вимірюваннях частоти і фазового зсуву?
  16. Що таке логометри і як вони використовуються для вимірювання фазового зсуву?
  17. Як побудована структурна схема обчислювального частото-міра?
  18. У яких діапазонах частот найбільш ефективно використовуються резонансні методи вимірювання частоти?
  19. Які фактори впливають на точність вимірювань фазового зсуву?
  20. Як осцилограф використовується для визначення фазового зсуву між сигналами?

### **Використана література до теми 8**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний по-сібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
3. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра га-лузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та при-ладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Жи-томир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
4. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання па-раме-трів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
5. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: на-вчально-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабі-ченка. Харків: Мірошніченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.



6. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, метрологія та управління якістю: навчальний посібник / Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.
7. Янчук І. В., Галунка О. Д., Сумарюк О. В. Метрологія і стандартизація: конспект лекцій / Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2021. 103 с.
8. Макота О. І., Олійник Л. П., Комаренська З. М. Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація: навчальний посібник / Національний університет "Львівська політехніка". Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2019. 171 с. ISBN 978-966-941-354-3.
9. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. 544 с.
10. Соколов С. В., Соколов О. С., Антоненко С. С. Контроль і вимірювання в технологічних та енергетичних системах: конспект лекцій. Суми: Сумський державний університет, 2020. 242 с.
11. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
12. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. [та ін.] Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Університет новітніх технологій; НАУ, 2017. 496 с.
13. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.
14. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 521 с.
15. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
16. Токар Ю. С., Караван Ю. В. Основи стандартизації, метрології та сертифікації: посібник. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. 247 с.
17. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: навчальний посібник. Київ: Знання-Прес, 2003. 180 с.



## ТЕМА 9. ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ

Основні параметри напівпровідників, що вимірюються. Вимірювання характеристик діодів і транзисторів. Прилади для вимірювання опору і струму витоку. Технічні методи оцінки електронної провідності напівпровідників. Використання тестерів для напівпровідникових елементів. Статичні та динамічні характеристики напівпровідникових пристроїв. Висновки.

Напівпровідникові пристрої мають специфічні характеристики, які визначають їхню роботу та ефективність у різних електронних системах. Вимірювання параметрів таких пристроїв є важливим етапом як у процесі їх виготовлення, так і при тестуванні їхньої якості та відповідності до стандартів. У цій лекції розглядаються ключові параметри, які вимірюються, а також методи та обладнання, що використовуються для цього.

### 9.1 Основні параметри напівпровідникових пристроїв

Основні параметри, які необхідно вимірювати для оцінки якості напівпровідникових пристроїв, включають:

- Струмово-напругові характеристики (I-V): відображають залежність струму через пристрій від прикладеної напруги.
- Часові характеристики: такі як швидкість перемикання та затримка.
- Температурні характеристики: визначають, як пристрій реагує на різні температури.
- Параметри розсіювання потужності: важливі для визначення здатності пристрою до роботи в умовах високого навантаження.
- Параметри надійності: включають тести на витривалість і довговічність пристроїв.

### 9.2 Методи вимірювання

Існують різні методи вимірювання параметрів напівпровідникових пристроїв, серед яких виділяються:

- **Електричні методи:**
  - **Метод прямих вимірювань:** передбачає вимірювання напруги та струму за допомогою електрометрів або мультиметрів.
  - **Імпедансі вимірювання:** використовуються для аналізу частотних характеристик напівпровідникових приладів.
  - **Методи комбінованих сигналів:** застосовуються для отримання характеристик при різних робочих умовах.



- **Оптичні методи:**
  - **Фотоспектроскопія:** дозволяє аналізувати структуру та дефекти на рівні матеріалу.
  - **Люмінесцентний аналіз:** корисний для вивчення рекомбінації електронів і дірок у матеріалі.
- **Термічні методи:**
  - **Інфрачервона термографія:** дозволяє визначити локальні температурні розподіли на поверхні пристрою.
  - **Калориметричні вимірювання:** дають інформацію про теплову потужність та ефективність розсіювання тепла.

### 9.3 Обладнання для вимірювання параметрів

Для вимірювання параметрів напівпровідникових пристроїв використовуються спеціалізовані прилади:

- **Транзисторні тестери та аналізатори:** для вимірювання параметрів транзисторів, таких як коефіцієнт посилення та напруга насичення.
- **Аналізатори імпедансу та ємності:** застосовуються для вимірювання ємності, індуктивності та опору пристроїв.
- **Осцилографи та генератори сигналів:** використовуються для аналізу часових характеристик.
- **Спектрометри:** для оптичного та люмінесцентного аналізу матеріалів напівпровідників.

### 9.4. Особливості вимірювань для різних типів пристроїв

#### Діоди

Прямий струм ( $I_F$ ): вимірюється, щоб оцінити наскільки ефективно діод проводить електричний струм при подачі прямої напруги. Це дозволяє визначити його струмово-напругову характеристику.

Зворотний струм ( $I_R$ ): вимірюється у зворотному напрямку для оцінки рівня витоку струму. Чим менший зворотний струм, тим ефективніший діод як ізолятор при подачі зворотної напруги.

Зворотна напруга пробою ( $V_{BR}$ ): визначає максимальну зворотну напругу, при якій діод починає проводити струм у зворотному напрямку. Це критичний параметр для діодів, призначених для високовольтного застосування.

Основними параметрами випрямних діодів є:

- граничний прямий струм діода  $I_{пр}$  – максимально допустиме середнє значення струму через діод у прямому напрямку за визначених умов охолодження, у сучасних діодів  $I_{пр} = (0,1 \div 2200)$  А;
- максимально допустимий прямий струм діода (імпульсний)  $I_{пр\ max}$ , становить  $(10 \div 50)I_{пр}$  ;

- прямий спад напруги  $U_{пр}$ , тобто середнє значення напруги на діоді приграничному прямому струмі  $I_{пр}$ , для діодів з кремнію становить  $(0,6 \div 0,8)$  В;

- максимально допустима зворотна напруга  $U_{зв\ max}$ , що дорівнює максимально допустимому амплітудному значенню зворотної напруги, яке не призводить до виходу з ладу приладу за визначених умов охолодження,  $U_{зв\ max} = (50 \div 3000)$  В.

Виготовляються випрямні діоди переважно із кремнію (у перспективі – галію, як більш термостійкого).

Зняття вольт-амперної характеристики діодів проводиться по схемах представлених на рисунках 9.1 а, б.

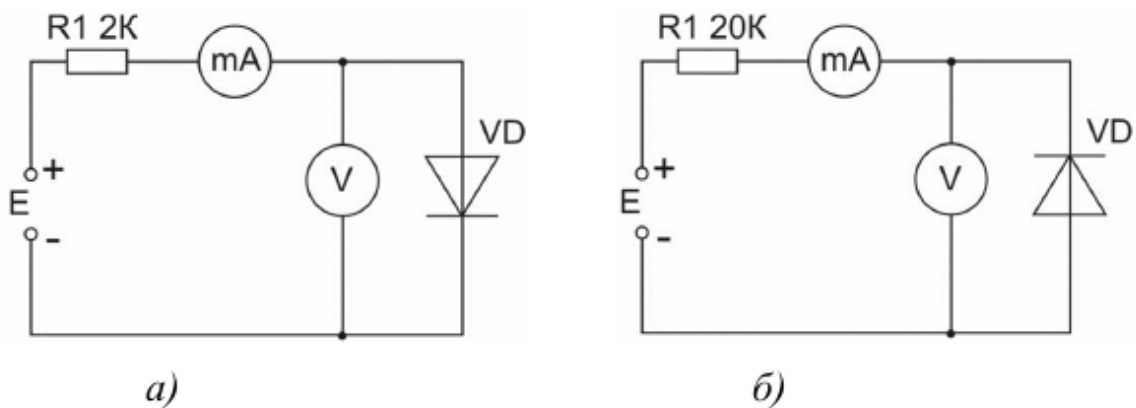



Рисунок 9.1 - Схема зняття вольт-амперної характеристики діодів:  
а) при прямому включенні; б) при зворотному включенні

Для зменшення погрішності вимірювань слід дотримувати включення вимірювальних приладів. При прямому включенні діода по схемі (рис. 9.1а) міліамперметр вимірює суму струмів, що проходять через вольтметр і діод. Оскільки опори прямо включеного переходу мало в порівнянні з внутрішнім опором вольтметра, струм через діод значно перевищує струм вольтметра, і погрішність вимірювання струму буде незначною. Якщо по цій же схемі проводити вимірювання зворотного струму діода, то погрішність його вимірювання буде великою з огляду на те, що опір назад зміщеного переходу дуже великий, і струм вольтметра може у декілька разів перевищувати струм діода. Тому вимірювання зворотного струму діода слід проводити по схемі (рис. 9.1б), для якої існує деяка погрішність вимірювання напруги на діоді. Проте ця погрішність дуже мала, оскільки падіння напруги на низькоомному міліамперметрі значно менше, ніж падіння напруги на діоді.

### Транзистори (BJT, MOSFET)

Напруга насичення ( $V_{CE(sat)}$  для BJT,  $V_{DS(on)}$  для MOSFET): визначає мінімальну напругу, при якій транзистор переходить у режим насичення



або увімкненого стану. Чим нижче значення напруги насичення, тим менше тепла виділяється на транзисторі при великому струмі.

Коефіцієнт посилення по струму ( $h_{FE}$ ): вимірюється для ВІТ транзисторів і показує, наскільки ефективно транзистор посилює струм. Це ключовий параметр для розрахунку вхідного струму.

Граничні частоти ( $f_T$ ): визначають швидкість перемикання транзистора і його здатність працювати на високих частотах. Це важливо для застосувань в швидкісних і радіочастотних схемах.

### **Фотоприлади (Фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори)**

Чутливість до світла: вимірюється, щоб визначити, як швидко та ефективно фотоприлад реагує на зміну інтенсивності світла. Чутливість характеризує ефективність перетворення світлової енергії у електричний сигнал.

Темновий струм ( $I_D$ ): це струм, що протікає через фотопристрій у темряві. Низький рівень темного струму свідчить про високу якість матеріалу і стабільність роботи приладу.

Спектральна характеристика: показує, на які довжини хвиль світла прилад найбільш чутливий. Це критично для пристроїв, які мають працювати в конкретному спектрі (наприклад, в інфрачервоному або видимому діапазоні).

### **Світлодіоди (LED)**

Яскравість: один з основних параметрів, що визначає ефективність світлодіода. Вимірюється в люменах ( $lm$ ) і визначає загальну яскравість світлодіода при заданій нарузі.

Спектральна характеристика: вказує на пікову довжину хвилі, на якій світлодіод випромінює світло, а також ширину спектру випромінювання. Цей параметр важливий для забезпечення правильного кольору та його стабільності.

Робоча напруга ( $V_F$ ): характеризує напругу, при якій світлодіод працює у звичайному режимі. Важливою є стабільність робочої напруги при зміні струму, оскільки це впливає на його тривалість роботи та ефективність.

## **9.5 Прикладні аспекти та стандарти вимірювань**

Для точного вимірювання параметрів напівпровідникових пристроїв необхідно враховувати вплив зовнішніх факторів, таких як температура, вологість, частота та амплітуда прикладеної напруги. Існують міжнародні стандарти, такі як **IEC** та **JEDEC**, які регламентують методики тестування і вимірювання для забезпечення сумісності та якості продукції.




## Висновок

Вимірювання параметрів напівпровідникових пристроїв є складним, але критично важливим процесом для забезпечення їхньої функціональності та надійності. Відповідність міжнародним стандартам і використання сучасного обладнання гарантує, що такі пристрої працюватимуть належним чином у кінцевих продуктах.

## Контрольні запитання до теми 9

1. Які основні параметри напівпровідникових пристроїв вимірюються, і чому вони важливі?
2. Що таке струмово-напругові характеристики (I-V), і як вони впливають на роботу напівпровідників?
3. Як вимірюються параметри розсіювання потужності напівпровідникових пристроїв?
4. У чому полягає метод прямих вимірювань напруги і струму для напівпровідників?
5. Як використовуються імпеданси вимірювання для аналізу частотних характеристик напівпровідників?
6. Що таке фотоспектроскопія, і як вона допомагає у вивченні напівпровідникових матеріалів?
7. Як інфрачервона термографія використовується для аналізу температурних розподілів на поверхні пристроїв?
8. Які параметри діодів (наприклад, зворотний струм, зворотна напруга пробою) є найважливішими, і як вони вимірюються?
9. Як визначаються статичні та динамічні характеристики транзисторів (BJT, MOSFET)?
10. Що таке напруга насичення в транзисторах, і як вона впливає на їх ефективність?
11. Як вимірюються граничні частоти транзисторів, і чому це важливо для швидкісних схем?
12. Які параметри вимірюються у фотоприладах (фотодіоди, фоторезистори), і як вони впливають на їх продуктивність?
13. Що таке темновий струм у фотодіодах, і як його зменшення впливає на якість приладу?
14. Як спектральні характеристики світлодіодів впливають на якість і стабільність світловипромінювання?
15. У чому полягає важливість стандартів (IEC, JEDEC) у вимірюванні параметрів напівпровідників?
16. Як аналізатори імпедансу та ємності допомагають у визначенні параметрів напівпровідникових пристроїв?
17. Як осцилографи використовуються для вимірювання часових характеристик напівпровідників?
18. Чому врахування зовнішніх факторів (температура, вологість) є критичним під час вимірювання параметрів?

- 
19. Які відмінності між статичними і динамічними характеристиками напівпровідників, і як вони вимірюються?
  20. Як використання сучасного обладнання забезпечує точність вимірювання параметрів напівпровідникових пристроїв?

### **Використана література до теми 9**

1. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Житомир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
2. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
3. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: навчально-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабіченка. Харків: Мірошніченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.
4. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.
5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
6. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.
7. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 521 с.
8. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.

## ТЕМА 10. ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНИХ КІЛ. МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ, МАГНІТНА ПРОНИКНІСТЬ

Вимірювання параметрів магнітних кіл: магнітна індукція, проникність. Використання магнітометрів та ферометрів. Оцінка магнітної проникності матеріалів. Методи вимірювання магнітного потоку та магнітної напруги. Дослідження гістерезису в магнітних матеріалах. Критерії оцінки ефективності магнітних матеріалів. Висновки.

Вимірювання параметрів магнітних кіл є важливим етапом для оцінки ефективності магнітних матеріалів у різних електротехнічних застосуваннях. Основними характеристиками магнітних кіл є магнітна індукція та магнітна проникність, а також важливі такі параметри, як магнітний потік, магнітна напруга та характеристика гістерезису. Магнітні матеріали оцінюють по їх характеристиках та статистичних і динамічних параметрах.

### 10.1 Основні параметри магнітних кіл

У загальному випадку магнітне поле породжується рухом електричних зарядів (струмом) і характеризується напруженістю, яка не залежить від властивостей середовища, а визначається лише геометричними розмірами контуру та значенням струму в ньому і може бути визначена на основі закону Біо-Савара-Лапласа.

#### Магнітна індукція

Магнітне поле проявляється також у формі силової дії на рухомий електричний заряд. Основною характеристикою силової взаємодії магнітного поля з електричним струмом є магнітна індукція  $B$ .

Магнітна індукція  $B$  — це величина, що показує густину магнітного потоку в матеріалі (або індукція такого однорідного магнітного поля, в якому на кожний метр лінійного провідника зі струмом в один ампер діє сила в один ньютон.) і вимірюється в теслах (Тл). Вона відображає, наскільки сильно матеріал намагнічується під дією зовнішнього магнітного поля. Магнітна індукція визначається за формулою:

$$B = \mu_0 \mu H$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  — магнітна проникність вакууму.

$\mu$  — магнітна проникність матеріалу,

$H$  — напруженість магнітного поля.

Магнітне поле проявляється також у вигляді явища електромагнітної індукції. Згідно із законом електромагнітної індукції, змінне магнітне поле наводить в контурі електрорушійну силу, значення якої визначається швидкістю зміни магнітного потоку.



$e(t) = -\frac{d\Phi}{dt}$ , де  $\Phi$  - магнітний потік, який дорівнює сумарному потоку вектора магнітної індукції через контур з площею  $S$ :  $\Phi = \int_l B ds$ .

Іншою інтегральною характеристикою магнітного поля є магніторушійна сила МРС, значення якої між двома точками А і В визначається як:

$$F_{AB} = \int_A^B H dl.$$

Вимірювані магнітні величини в основному попередньо перетворюються в електричні, зручні для вимірювання. Перетворювачі магнітних величин використовують гальваноманітні явища, явища електромагнітної індукції, зміни магнітного стану феромагнетика в магнітному полі, квантові явища та силову взаємодію досліджуваного поля з полем постійного магніту або контуру з електричним струмом.

Явище електромагнітної індукції покладене в основу принципу дії індукційних та феромодуляційних вимірювачів магнітного потоку.

### **Магнітна проникність**

Магнітна проникність  $\mu$  характеризує здатність матеріалу до намагнічування. Вона поділяється на абсолютну  $\mu$  та відносну  $\mu_r$  магнітну проникність, причому відносна показує, у скільки разів магнітна проникність матеріалу перевищує магнітну проникність вакууму:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

де  $\mu_0$  — магнітна проникність вакууму.

## **10.2 Використання магнітометрів та ферометрів**

- **Магнітометри** — прилади для вимірювання напруженості магнітного поля або магнітного потоку. Вони застосовуються для точного вимірювання магнітної індукції та характеристик магнітного поля у матеріалах. Серед поширених типів магнітометрів: гаусметри, скалярні та векторні магнітометри.

- **Ферометри** — використовуються для оцінки магнітних характеристик феромагнітних матеріалів. З їх допомогою вимірюють параметри, такі як магнітна проникність і коерцитивна сила, що допомагає визначити здатність матеріалу до намагнічування і розмагнічування.

### **Оцінка магнітної проникності матеріалів**

Оцінку магнітної проникності здійснюють через аналіз петлі гістерезису, яка є залежністю магнітної індукції від напруженості магнітного поля. Це досягається за допомогою таких методів:

**Метод гістерезисної петлі:** За допомогою магнітометрів фіксують зміни магнітної індукції при різних напруженостях поля, формуючи петлю



гістерезису. Вона дозволяє визначити величину залишкової індукції та коерцитивної сили.

**Пермеаметрія:** Спеціальні пермеаметри вимірюють відносну магнітну проникність, що є особливо важливим при визначенні матеріалів для трансформаторів, дроселів та індуктивностей.

### 10.3 Методи вимірювання магнітного потоку та магнітної напруги

**Магнітний потік  $\Phi$ :** Вимірюється за допомогою інтегрування сигналу з котушки індуктивності або застосування інтегральних датчиків магнітного потоку. Потік може обчислюватися через площу петлі та інтенсивність магнітного поля.

**Магнітна напруга** — це величина, яка відображає енергетичний стан магнітного поля. Її обчислюють через геометричні параметри магнітного кола та магнітні характеристики матеріалу. Для вимірювання використовуються прямі та непрямі методи, зокрема датчики поля або розрахункові методики на основі експериментальних даних.

#### Дослідження гістерезису в магнітних матеріалах

Гістерезис відображає намагніченість матеріалу під час його намагнічування та розмагнічування. Основні характеристики:

- **Коерцитивна сила** — мінімальне поле, яке необхідне для розмагнічування матеріалу.
- **Залишкова індукція** — величина магнітної індукції після зняття зовнішнього поля.

Для дослідження гістерезису використовують:

- **Гістерезисні цикли:** Будують петлю гістерезису, вимірюючи індукцію при змінній напруженості поля.
- **Ферометри:** Оцінюють ефективність феромагнітних матеріалів і їх здатність до збереження залишкової намагніченості.

#### Критерії оцінки ефективності магнітних матеріалів

При виборі магнітного матеріалу враховуються такі параметри:

- **Висока магнітна проникність** для кращого пропускання магнітного потоку в котушках, трансформаторах.
- **Низькі втрати на гістерезис**, що є особливо важливим для матеріалів, які використовуються на високих частотах.
- **Коерцитивна сила** — для магнітів потрібна висока коерцитивність, а для м'яких матеріалів бажана низька.

### 10.4 Принципи вимірювання магнітних параметрів

Принцип дії **індукційних перетворювачів** заснований на явищі електромагнітної індукції: виникненні ЕРС у вимірювальній котушці при зміні магнітного потоку  $\Phi$ , що пронизує витки котушки (рис. 10.1):

$$e(t) = -\frac{d\Psi}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt} \cos\alpha,$$

де  $\Psi = w\Phi_x$  - повний магнітний потік (потокозчеплення),  $w$  - кількість витків вимірювальної котушки;  $\alpha$  - кут між напрямом магнітного поля та нормаллю до площини витків вимірювальної котушки

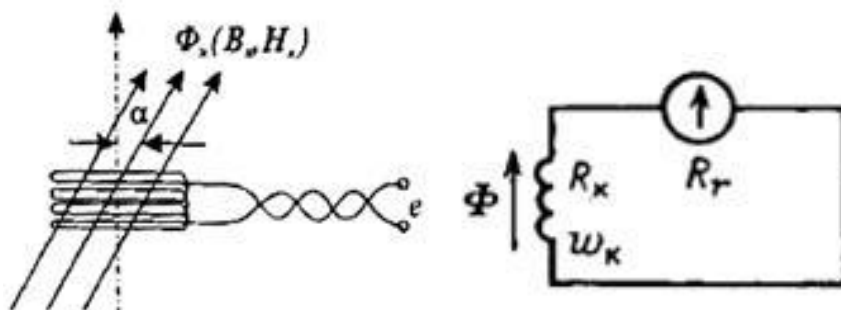


Рисунок 10.1 - Вимірювальна котушка в магнітному полі

**Індукційні перетворювачі** використовують в засобах для вимірювань як в сталих, так і в змінних магнітних полях. У першому випадку зміну потокозчеплення досліджуваного потоку з витками вимірювальної котушки можна здійснити швидким винесенням котушки за межі досліджуваного магнітного поля. При цьому зміна потокозчеплення за інтервал часу між моментами початку  $t_1$  та кінця  $t_2$  винесення котушки за межі полі дорівнюватиме

$$\Delta\Psi_x = w(\Phi_k - \Phi_x) = \int_{t_1}^{t_2} e dt = R \int_{t_1}^{t_2} I dt = Rq,$$

де  $I$  - струм,  $q$  - кількість електрики,  $R = R_k + R_r$  - опір вимірювального кола, включаючи опір котушки та вихідного вимірювального приладу.

При  $\Phi_k = 0$  буде  $\Delta\Phi = \Phi_k - \Phi_x = -\Phi_x$  а отже, значення вимірюваного потоку  $\Phi_x$  може бути перетворене в імпульс ЕРС або імпульс струму.

Вимірювання імпульсу струму здійснюється за допомогою **балістичного гальванометра**. Під час протікання через рамку гальванометра короткочасного імпульсу струму, максимальна амплітуда відхилення вказівника гальванометра (балістичне відхилення):

$$\alpha_{\max} = S_b q = \frac{1}{C_b} q,$$

де  $S_b$  і  $C_b$  - балістична чутливість і ціна поділки.

Тоді  $C_\Psi = C_a R$  - ціна поділки балістичного гальванометра по потокозчепленню.

Вимірявши балістичним гальванометром  $\Delta\Psi = w\Phi_x$ , і знаючи кількість витків в котушки, можна знайти і значення вимірюваного потоку:  
 $\Phi_x = C_{\Phi} \alpha = \alpha_{\max} \cdot C_{\Phi} \cdot R / w$

При рівномірному обертанні вимірювальної котушки з кутовою швидкістю  $\omega = 2\pi f$  в ній наводиться ЕРС, яка змінюється за синусоїдним законом:

$$e_x(t) = E_m \sin \omega t = \omega k_{\omega} B_x \sin \alpha \sin \omega t$$

де  $\alpha$  - кут між напрямом вектора магнітної індукції та віссю обертання рамки (котушки).

Перетворювачі з обертальною котушкою мають коефіцієнт перетворення до декількох сот вольт на тесла і забезпечують перетворення магнітної індукції від  $10^{-4}$  до  $10^7$  Тл з похибкою до 0,1%. Недоліком таких перетворювачів є наявність двигуна для забезпечення обертального руху вимірювальної котушки.

Якщо досліджуване магнітне поле рівномірне, тобто  $\Phi_x = B_x S$ , а у випадку, коли магнітна проникність середовища у всіх точках простору охопленого контуром витків вимірювальної котушки однакова, тобто  $\Phi_x = \mu\mu_0 SH_x$ , то наведена у вимірювальній котушці ЕРС може бути мірою не тільки магнітного потоку, але і магнітної індукції та напруженості магнітного поля.

Для вимірювань сталого магнітного потоку індукційно-імпульсним методом існують спеціальні вимірювачі магнітного потоку - **веберметри**. Магнітоелектричний вимірювальний механізм веберметра відрізняється від звичайних магнітоелектричних механізмів тим, що в нього відсутні протидіючі пружини.

Струм до рамки підводиться за допомогою "безмоментних" струмопроводів (струмопроводів з дуже незначним протидіючим моментом). У таких випадках відхилення рухомої частини пропорційне ЕРС, що наводиться в під'єднаній до рамки вимірювальній котушці при зміні її повного потокозчеплення з вимірюваним магнітним потоком  $\Phi_x$ -

$$\alpha = S_{\Phi} \int_0^i e dt = S_{\Phi} \Delta\Psi = S_{\Phi} w \Phi_x$$

де  $w$  - кількість витків вимірювальної котушки;  $S_{\Phi}$  - чутливість приладу до потоку.

Отже, відхилення вказівника веберметра пропорційне вимірюваному потоку практично не залежить від опору вимірювального кола, 10... 50 Ом.

Значно чутливі і такі, покази яких не залежать в значно ширших межах від опору зовнішнього кола (до 500... 1000 Ом), є фотогальванометричні веберметри. Нижня межа вимірювань таких приладів становить одиниці мікробебер при зведеній похибці 1... 1,5%.

**Фотогальванометричний веберметр** являє собою веберметр з фото-гальванометричним підсилювачем, що має від'ємний зворотний зв'язок по похідній вихідного струму, котрий здійснюється за допомогою RC-ланки (рис. 10.2). Принцип дії приладу такий.

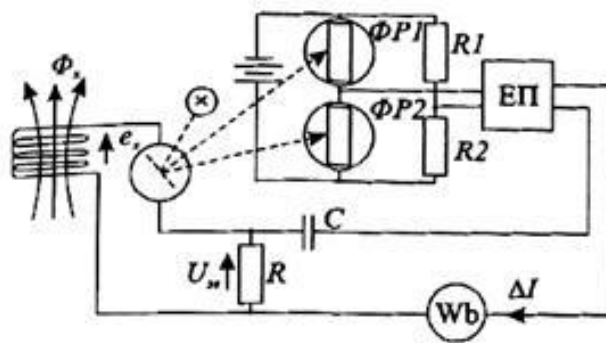


Рисунок 10.2 - Принципова схема фотогальванометричного веберметра

При зміні потокозчеплення з вимірювальною котушкою виникає ЕРС під дією якої в колі магнітоелектричного гальванометра протече струм і спричинить відхилення рухомої частини. Промінь світла від дзеркальця гальванометра змінить освітленість фоторезисторів  $\Phi P_1$  та  $\Phi P_2$ , що приведе до розбалансу мостового кола, утвореного з названих фоторезисторів та резисторів  $R_1$  і  $R_2$ . Напряга розбалансу підсилюється і подається в коло I зворотного зв'язку, в результаті чого на виході диференціальної RC-ланки виникне напруга зворотного зв'язку, пропорційна швидкості зміни струму I.

Зміна струму буде відбуватись до тих пір, поки напруга зворотного зв'язку не зрівноважить ЕРС, яка наводиться у вимірювальній котушці, тобто до моменту рівності:  $e_x = u_x$  або  $-\frac{d\psi}{k} = k \frac{dl}{dt}$ , звідки  $\Delta I = -\frac{d\psi}{k} = \frac{w_k}{k} \Delta \Phi_x$ .

При винесенні котушки за поле  $\Delta I = \frac{w_k}{k} \Phi_x$ .

Завдяки використанню від'ємного зворотного зв'язку вхідний опір фотогальванометричного підсилювача збільшується, що дозволяє використовувати вимірювальні котушки з досить високим опором (100...200 Ом).

У **феромодуляційних перетворювачах** модуляція потокозчеплення здійснюється за рахунок зміни магнітної проникності ферромагнетика, з якого виготовлене осердя.

Найпоширенішими феромодуляційними перетворювачами є перетворювачі з поздовжнім магнітним збудженням. Такі ферозонди (рис. 10.3)

мають два ідентичні пермалоеві осердя 1 і 2 з нанесеними на них намагнічувальними обмотками  $w_1$  та  $w_1'$ , увімкненими послідовно-зустрічно. Вимірювальна обмотка 3 охоплює обидва стержні. Амплітуда напруженості намагнічувального поля повинна бути значно більшою напруженості досліджуваного поля і достатньою для намагнічування стержня до насичення.

При повній ідентичності обох половин ферозонда і відсутності досліджуваного поля ЕРС що наводиться у вимірювальній обмотці дорівнює нулю. При наявності досліджуваного поля, напрямленого вздовж стержнів, симетрія потоків порушується, а у вимірювальній обмотці наводиться ЕРС парних гармонік (непарні віднімаються):

$$e_{2f} = 4\omega k_{\omega} B_x \cos \alpha \cdot \mu_2 \cdot \sin 2\omega t$$

де  $\mu_2 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \mu(\omega t) \cos 2\omega t d\omega t$  амплітуда другої гармоніки диференціальної магнітної проникності, а  $\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH}$  - кут між вектором досліджуваного поля і напрямом осі ферозонда.

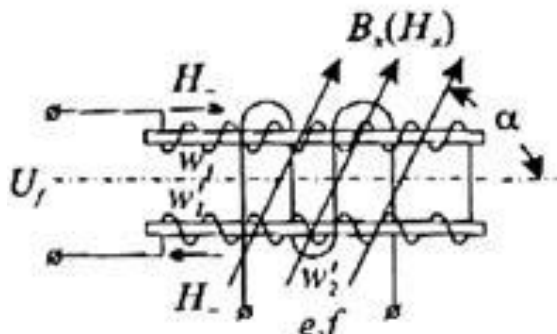


Рисунок 10.3 - Диференційний ферозонд

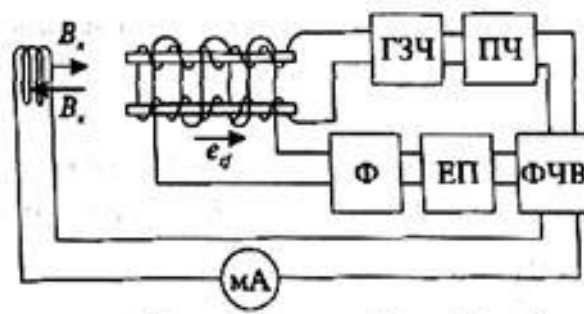


Рисунок 10.4 - Тесламетр

На рис. 10.3 наведена структурна схема феромодуляційного тесламетра.

Намагнічувальна обмотка фероіндукційного перетворювача (ферозонду) живиться від генератора звукової частоти ГЗЧ, створюючи змінне магнітне поле  $2L$ . При накладанні на змінне поле  $B$  вимірювального поля  $V_x$  у вимірювальній обмотці наводиться ЕРС, друга гармоніка якої через фільтр  $\Phi$  подається на підсилювач і після підсилення — на вхід фазочутливого випрямляча ФЧВ, який живиться від цього ж генератора ГЗЧ через подвоювач частоти ПЧ.

Для підвищення точності в цих приладах використовують компенсаційний метод вимірювань, при якому вимірюване магнітне поле компенсується однаковим за модулем з вимірюваним і протилежним за знаком компенсувальним полем  $V_k$ . Для створення; компенсувального поля постійний струм з виходу фазочутливого випрямляча надходить на компенсувальну обмотку і створює компенсувальне поле. В коло зворотного зв'язку увімкнений міліамперметр, шкала якого проградуйована в одиницях вимірюваної величини.

Феромодуляційний метод, характеризується високою чутливістю та малими розмірами, широко використовується для вимірювань параметрів слабких сталих та низькочастотних магнітних полів в діапазонні  $10^{-9}$  до  $10^{-4}$  Тл зокрема при дослідженнях магнітного поля Землі, з похибкою 1...2%.

В основу побудови первинних перетворювачів магнітної індукції можуть бути покладені гальваноманітні ефекти Гауса та Холла.

**Суть ефекту Холла** полягає у виникненні поперечної різниці потенціалів (ЕРС Холла) на бічних гранях розміщеної в магнітному полі напівпровідникової пластинки при проходженні по ній струму  $I$  (рис. 10.5). Значення ЕРС Холла:  $e_h = \frac{R_h}{d} IB$ ,

$$e_h = \frac{R_h}{d} IB,$$

де  $B$  - вимірювана індукція;  $R_h$  - коефіцієнт Холла, значення якого залежить від природи матеріалу чутливого елемента;  $d$  - його товщина.

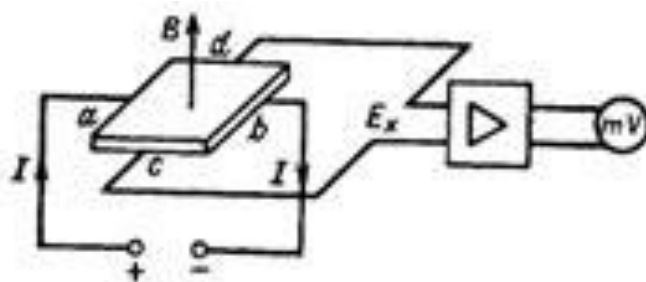



Рисунок 10.5 - Ефект Холла

**Суть гальванорезистивного ефекту (ефекту Гауса)** полягає в зміні питомого електричного опору гальваноманітного елемента (магнітрезистора) під дією магнітного поля:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = A_{\frac{\rho}{B}} (\mu B)^m$$



де  $\rho_0$  — питомий електричний опір напівпровідника при відсутності поля;  $A_\Phi$  — коефіцієнт, що залежить від форми магніторезистора; показник степеню  $m = 2$  для слабких магнітних полів (переважно  $B < 0,2 \dots 0,4$  Тл), для яких виконується умова  $\mu B < 1$  і  $m = 1$  для сильних магнітних полів, коли  $\mu B \gg 1$ .

Тоді функція перетворення магніторезистивного перетворювача можна апроксимувати виразом:  $R_B = R_0(1 + A_\Phi(\mu B)^m)$ .

Характер залежності опору від магнітної індукції визначається фізичними властивостями матеріалу перетворювача, а також його формою.

Гальваномагнітні ефекти Холла та Гауса лежать в основі принципу дії відповідно магнітогенераторних та магніторезистивних перетворювачів і вимірювальних приладів на їх основі.

Поєднання перетворювачів Холла, з цифровими мілівольтметрами та мікропроцесорними пристроями для корекції похибок забезпечують створення одно- та багатоканальних тесламетрів для вимірювань магнітної індукції сталого та змінного магнітного поля в межах  $10^{-2} \dots 10$  Тл з похибкою  $0,2 \dots 0,5\%$  в діапазоні температур  $4 \dots 400$  К.

Принцип дії **квантових перетворювачів** магнітних величин заснований на використанні явища магнітного резонансу. Магнітний резонанс зумовлений взаємодією мікрочастинок (ядер, електронів, атомів, молекул), які мають власний магнітний момент і момент кількості руху (спін), із зовнішнім магнітним полем. В результаті такої взаємодії спостерігається вибіркове поглинання або випромінювання речовиною електромагнітних хвиль певної довжини.

Якщо на мікрочастинку з магнітним моментом  $M_i$  діяти змінним магнітним полем, спрямованим під деяким кутом до вектору  $M_i$ , з індукцією  $B_f$  і регульованою частотою  $f$ , то при деякому значення частоти буде виникає резонансне поглинання високочастотної енергії зразком. Резонансна частота рівна:

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} B_x,$$

де  $\gamma$  - гіромагнітне відношення (відношення магнітного моменту до механічного моменту кількості руху) сталє для даного виду атомів.

Вимірявши частоту прецесії (електромагнітних коливань), можна з високою точністю визначити значення індукції магнітного поля.

Внаслідок хаотичної орієнтації магнітних моментів окремих частин сумарний магнітний момент  $M$  дорівнює 0. Дія зовнішнього магнітного поля приводить орієнтації сумарного магнітного моменту  $M$  в одиниці об'єму речовини в напрямі поля  $B_x$  тобто до намагніченості. Для спостереження сигналу прецесії необхідно відхилити сумарний момент  $M$  від напрямку поля  $B_x$  та деякий кут  $\alpha$ , тобто поляризувати мікрочастинки. З цією метою використовують поляризоване поле  $B_n$ . (рис. 10.6).

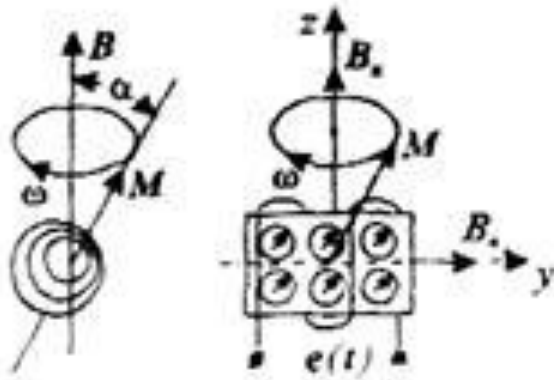


Рисунок 10.6 - Поляризоване поле  $B_n$

Залежно від того, які частинки робочої речовини резонують, існує декілька різновидів магнітного резонансу: ядерний магнітний резонанс (ЯМР) електронний парамагнітний резонанс (ЕПР), феромагнітний та ін.

Поляризацію мікрочастки можна здійснювати різними способами: дією сильного магнітного поля, опроміненням робочої речовини електромагнітним полем, тощо

Метод ядерного резонансного поглинання (вимушеної ядерної прецесії) заснований на явищі поглинання ядрами енергії високочастотного зовнішнього поля, що діє на робочу речовину одночасно з дією вимірюваного сталого магнітного поля.

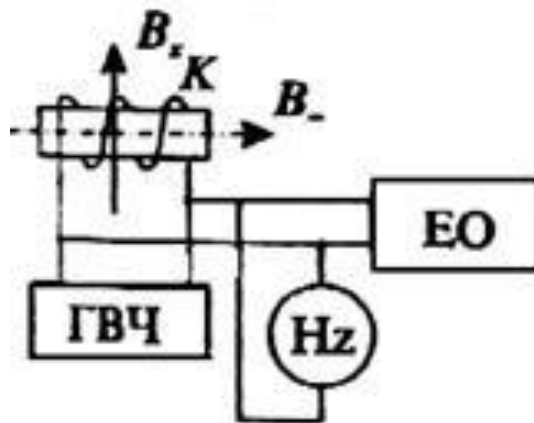


Рисунок 10.7 - Принцип дії ядерного резонансного перетворювача

Принцип дії ядерного резонансного перетворювача пояснює рис. 10.7. Зразок (ампула з водою) розміщується в середині котушки. Якщо на вимірюване стале магнітне поле  $B_x$  накласти під кутом  $90^\circ$  високочастотне змінне поле що створюється генератором високої частоти ГВЧ з регульованою частотою. Плавна зміна частоти ГВЧ дозволяє встановити частоту  $f$ , при якій спостерігається ЯМР. При цьому відбувається поглинання атомами речовини енергії змінного поля, що приводить до зменшення напруги на затискачах котушки. Отже, в момент резонансу вихідна напруга

генератора мінімальна, що фіксується за допомогою електронного осцилографа ЕО. Частота  $f$  визначається вимірюванням частоти генератора.

Вимірювання параметрів магнітних полів методом компарування (опосередкованого порівняння)

Метод компарування (метод опосередкованого порівняння) заснований на порівнянні цих чи інших проявів магнітного поля або ефектів (ЕРС Холла, ЕРС індукції, магніторезистивний ефект і ін.), пропорційних вимірюваній величині та зразкової величини, що створюється мірою. Такі вимірювання проводились, наприклад, при визначенні параметрів магнітних полів з великою неоднорідністю, в широкому діапазоні температур, при необхідності точного вимірювання середніх та сильних змінних магнітних полів (для останніх відсутні точні міри).

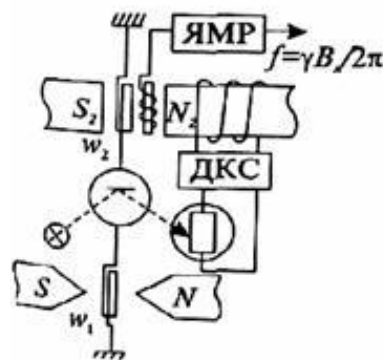



Рисунок. 10.8 - Принципова схема електромеханічного компаратора магнітних вимірювань

Як і для електричних величин, компаратори для вимірювань магнітних величин поділяють на компаратори одночасного порівняння та компаратори різночасного порівняння. В перших використовують два ідентичні за принципом дії та параметрами компараторні перетворювачі, один з яких розміщують в досліджуваному магнітному полі, інший - в магнітному полі, що створюється багатозначною мірою. При різночасному компаруванні один і цей самий перетворювач розміщують по чергову в досліджуване і зразкове поля.

На рис.10.8 наведена схема електромеханічного компаратора одночасного порівняння для вимірювань параметрів неоднорідних магнітних систем зі сталими магнітами.

Як багатозначна міра магнітної індукції тут використовується електромагніт, магнітна індукція в повітряному проміжку якого вимірюється за допомогою ЯМР-тесламетра. Необхідне значення магнітної індукції створюється струмом від джерела керуваного струму ДКС, значення струму якого керується сигналом від перетворювача недокомпенсації (світловим покотом на фоторезисторі ФР).



У компараторі порівнюються обертальні моменти магнітоелектричних механізмів рамки одного з яких розміщена в досліджуваному полі  $NS$ , а рамка іншого — в однорідному магнітному полі міри.


При відомих параметрах рамки можна знайти магнітний потік, що перетинає площу рамки (за умови, що всі витки цієї рамки мають однакову площу)

### **Висновки**

Вимірювання параметрів магнітних кіл дозволяє точно визначати характеристики магнітних матеріалів і використовувати їх в оптимальних режимах. Застосування магнітометрів і ферометрів дає змогу досліджувати магнітну індукцію, проникність та інші важливі характеристики, що важливо для проектування ефективних електротехнічних пристроїв.


### **Контрольні запитання до теми 10**

1. Що таке магнітна індукція і магнітна проникність, і як вони визначаються?
2. Як вимірюються магнітна індукція та магнітна напруженість у магнітних матеріалах?
3. У чому суть закону Біо-Савара-Лапласа, і як він застосовується для розрахунку магнітного поля?
4. Які прилади використовуються для вимірювання магнітної індукції та магнітного потоку?
5. Що таке магніторушійна сила (МРС), і як вона визначається?
6. Як функціонують магнітометри і ферометри, і для яких цілей вони застосовуються?
7. Що таке гістерезис, і які його основні параметри?
8. Як досліджується петля гістерезису, і які висновки можна зробити з її форми?
9. У чому суть методу вимірювання магнітного потоку за допомогою індукційних перетворювачів?
10. Як феромодуляційні перетворювачі використовуються для вимірювання магнітних параметрів?
11. Що таке ефект Холла, і як він застосовується для вимірювання магнітних величин?
12. Як гальваноманітний ефект (ефект Гаусса) використовується у магніторезистивних перетворювачах?
13. Які особливості веберметрів і як вони вимірюють магнітний потік?
14. Як квантові перетворювачі застосовуються для визначення магнітної індукції?
15. Що таке ядерний магнітний резонанс (ЯМР), і як він використовується для вимірювання магнітних параметрів?
16. Як метод компарування використовується для визначення магнітних величин?

- 
17. Які критерії оцінки ефективності магнітних матеріалів, і як вони вимірюються?
  18. Як вплив частоти і температури враховується при вимірюваннях магнітних параметрів?
  19. Що таке магнітна напруга, і як вона розраховується?
  20. Як магнітна індукція визначається за допомогою перетворювачів з обертальною котушкою?

### **Використана література до теми 10**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
3. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Жи-томир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
4. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
5. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: навчально-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабіченка. Харків: Мірошніченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.
6. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, метрологія та управління якістю: навчальний посібник / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.
7. Янчук І. В., Галунка О. Д., Сумарюк О. В. Метрологія і стандартизація: конспект лекцій / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2021. 103 с.
8. Макота О. І., Олійник Л. П., Комаренська З. М. Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація: навчальний посібник / Нац. ун-т "Львів. політехніка". Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2019. 171 с. ISBN 978-966-941-354-3.
9. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.

- 
10. Соколов С. В., Соколов О. С., Антоненко С. С. Контроль і вимірювання в технологічних та енергетичних системах: конспект лекцій. Суми: Сумський державний університет, 2020. 242 с.
  11. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
  12. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. [та ін.] Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. 496 с.
  13. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.
  14. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 521 с.
  15. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
  16. Токар Ю. С., Караван Ю. В. Основи стандартизації, метрології та сертифікації: посібник. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. 247 с.
  17. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: навчальний посібник. Київ: Знання-Прес, 2003. 180 с.

## ТЕМА 11. ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ, МЕХАНІЧНИХ ЗУСИЛЬ ТА ПАРАМЕТРІВ РУХУ

Вимірювання геометричних розмірів, товщини відстані між об'єктами, рівня, механічних зусиль, параметрів руху. Висновки.


У класифікації фізичних величин за їх фізичними властивостями (прийнятій, зокрема, в Міжнародній системі одиниць) одну із груп 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 SI. 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.

Із механічних величин, які вимірюються найчастіше, основними є механічні зусилля, які поділяються на зосереджені, зокрема спрямовані лінійно (механічні сили) та обертові (крутні моменти), а також розподілені зовнішні зусилля (тиск) та внутрішні розподілені зусилля, що виникають в тілі досліджуваного об'єкта (механічні напруження).

**Методи вимірювань різних видів механічних зусиль** мають багато спільного. Їх можна поділити на чотири групи, що базуються на вимірюванні:

- деформацій досліджуваного об'єкта або деформацій пружного елемента, які виникають під дією вимірюваного зусилля;
- параметрів або властивостей перетворювачів (електричний чи магнітний опір, частота власних коливань, виникнення електричного заряду тощо), що змінюються під дією досліджуваних зусиль;
- безпосередньо властивостей досліджуваного об'єкта чи середовища (на-приклад, швидкості розповсюдження звуку, теплопровідності газу, електричної провідності, магнітної проникності тощо), які залежать від зусиль, що діють на них;
- зусиль методом зрівноважувального перетворення, при якому вимірюване зусилля зрівноважується компенсуючим зусиллям.

Перша група методів найширше застосовується для визначення механічних напружень вимірюванням деформації поверхні досліджуваного об'єкта, а також у приладах для вимірювання сил, крутних моментів та тиску, що попередньо перетворюються в деформацію первинного пружного перетворювального елемента.



Друга група методів використовується у засобах вимірювань, основаних на застосуванні п'єзоелектричних та магнітопружних перетворювачів, безпосередньою вхідною величиною яких є досліджуване зусилля.

На залежності властивостей чи параметрів досліджуваного об'єкта від зусиль, що діють на них, основані, наприклад, ультразвуковий, магнітопружний, термопружний та інші методи вимірювань механічних напружень.

Метод зрівноважувального перетворення використовується для побудови точних засобів вимірювань сил, крутних моментів, тиску.

**Під параметрами руху твердого тіла** розуміють лінійні та кутові переміщення центру мас і всі їх похідні в часі - швидкість, прискорення, різкість тощо.

Загалом параметри руху - векторні величини, тому їх необхідно вимірювати, визначаючи модуль відповідного вектору та кута, що характеризує положення вектору у вибраній системі координат, або визначення складових вектору на осях вибраної системи відліку. Здебільшого є потреба вимірювання лише модуля відповідного параметра руху.

Між параметрами руху існує просторовий та часовий зв'язок. Під просторовим розуміють взаємний зв'язок лінійних та кутових параметрів руху, наприклад,  $\varepsilon = a/R$  (тут  $\varepsilon$  - кутове прискорення,  $a$  - лінійне прискорення на відстані  $R$  від центра обертання досліджуваного об'єкта). Це дає змогу визначити параметри лінійного руху через геометричні розміри ( $R$ ) та параметри кутового руху, і навпаки.

Часовий взаємозв'язок параметрів руху - це інтегрально-диференціальний зв'язок між ними, внаслідок якого одні параметри руху можуть бути визначені через інші їх інтегруванням чи диференціюванням, наприклад, знаючи швидкість, можна визначити прискорення:  $a = dv/dt$ .


Методи вимірювань параметрів руху можуть бути розділені на дві групи:

- абсолютні (інерціальні) методи, в основу яких покладений справедливий для класичної механіки принцип інерції; параметри руху в цьому випадку вимірюються в інерціальному просторі, тобто в просторі, в якому справедливі закони Ньютона (просторі, що не обертається довкола так званих "нерухомих зірок");

- відносні методи, для яких параметри руху одної системи координат вимірюють відносно іншої системи координат.

Вимірюючи параметри руху необхідно вибрати систему відліку.

Залежно від методу, покладеного в основу принципу дії вимірювального засобу, всі вимірювальні засоби можуть бути розділені на дві групи: **інерціальні** та **контактні**. В інерціальних засобах вимірювань відсутній безпосередній контакт між досліджуваним об'єктом та нерухомою системою відліку, а вхідною величиною первинних перетворювачів є сила інерції, що сприймається корпусом давача, з яким зв'язана власна (рухома) система відліку. Інерціальні прилади для вимірювань параметрів лінійного руху прийнято називати сейсмічними, а кутового - гіроскопічними.



До контактних належать засоби, основані на безпосередньому контакті між рухомим об'єктом і системою, прийнятою за нерухому. Контакт може бути механічним, оптичними, акустичними чи іншими.

Перш ніж перейти до конкретних методів та засобів вимірювань параметрів руху, нагадаємо назви засобів, призначених для вимірювань тих чи інших параметрів:

**велосиметр** - прилад для вимірювань швидкості при лінійному переміщенні досліджуваного об'єкта;

**тахометр** - прилад для вимірювань кутової швидкості обертання валу;

**спідометр** - прилад для вимірювань швидкості поступального руху та довжини пройденого шляху (переміщення);

**акселерометр** - прилад для вимірювань прискорення;

**віброакселерометр** - прилад для вимірювань параметрів вібрацій (амплітуди вібрацій та віброприскорень).

Діапазон вимірюваних швидкостей дуже широкий - від часток мікрометра за секунду до космічних швидкостей і від часток оберту за секунду до понад 5 000 об/с; прискорень - від  $10^{-5}$  до 20 000 м/с<sup>2</sup>.

## 11.1 Вимірювання геометричних 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:

- вимірювання лінійних розмірів в діапазоні від часток мкм до декількох десятків метрів та кутових розмірів, від 0,1" до 360°. Найпоширенішими в цій групі є вимірювання розмірів деталей, відхилення розміру деталі від заданого значення, вимірювання параметрів шорсткуватості поверхні, товщини покриття;
- 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;
- визначення координат об'єктів та відстаней між об'єктами, зокрема і космічними, що знаходяться в межах від одиниць міліметра до мільйонів кілометрів.

Під впливом інтенсивного розвитку інтегральних схем, мікропроцесорних пристроїв відбулось корінне оновлення та значне урізноманітнення техніки, що застосовується при вимірюваннях лінійних та кутових розмірів. Нові апаратні рішення приводять до появи нових різновидностей методів вимірювань. Донедавна для вимірювань геометричних розмірів застосовували здебільшого прилади, що працюють за аналоговим принципом. Сьогодні 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.

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 межах 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

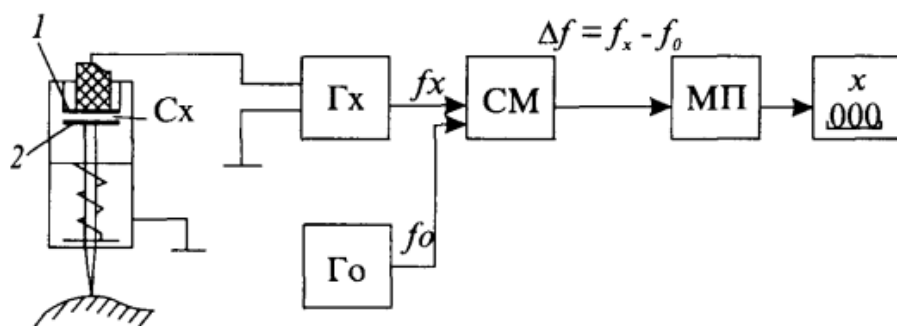


Рисунок 11.1 – Принцип дії ємнісного профілометра

Рис. 11.1 пояснює принцип дії вимірювача малих розмірів на основі ємнісного перетворювача, який є елементом LC-контурного кварцового генератора. Ємнісний перетворювач має нерухомий електрод 1, напилений на полірований скляний стержень, та рухомий електрод 2, механічно з'єднаний з голкоподібним щупом, закріпленим в корпусі за допомогою плоских пружин. Ємнісний перетворювач за допомогою кабелю з'єднаний з кварцовим генератором  $\Gamma_x$ , вихідна частота  $f_x$  якого є функцією ємності  $C_x$  між між рухомим та нерухомим електродами. Частота  $f_x$  та частота  $f_0$  від опорного генератора частоти  $\Gamma_0$  подаються на вхід суматора СМ, вихідна частота якого  $\Delta f = f_x - f_0$ . Після лінеаризації за допомогою мікропроцесора МП сигнал надходить на цифровий відліковий пристрій, проградуирований в мікрометрах.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0}}$$

Якщо  $C_x = C_{x0} + \Delta C = C_0 + \Delta C$

$$f_x = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_x}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0 + \left(1 + \frac{\Delta C}{C_0}\right)}}$$

Отримуємо

$$\Delta f \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C_0} f_0.$$

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 вібруючого 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-профілеметри, в яких вимірювальний щуп у своїй верхній частині має закріплений феритовий стержень, який при переміщенні штока змінює індуктивність вимірювальної котушки. Котушка, індуктивність  $L_x$  якої є функцією вимірюваного переміщення  $x$ , становить частотно-залежний елемент LC-генератора. Якщо частота опорного генератора

$$\Delta f \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L_0} f_0.$$

Мікрометри-профілеметри з індуктивним первинним перетворювачем дають змогу вимірювати мікронерівності від 0,1 мкм, а верхня границя вимірювань становить звичайно декілька мм.

Здебільшого в приладі- та машинобудуванні необхідно вимірювати не все значення розміру, яке може досягати десятків см і більше, а лише його відхилення від деякого заданого значення, оскільки під час виготовлення деталі контролюється її розмір. Ці відхилення звичайно не перевищують часток мм, а отже, названі мікрометри можуть бути застосовані для цих потреб.

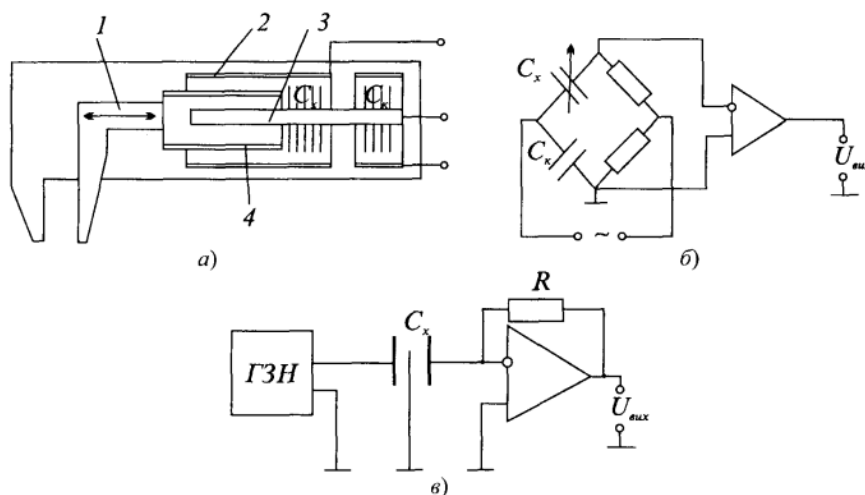



Рисунок. 11.2 - Ємнісний штангенциркуль та приклади його вимірювальних кіл

Для вимірювань розмірів у діапазоні часток міліметра до декількох сантиметрів застосовують штангенциркуль (рис. 11.2,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 рис. 11.2,б, в.

Електрофізичні методи застосовують звичайно у вимірювачах товщини шару покриття та тонких листових виробів.

## 11.2 Вимірювання товщини шару покриття

Методи вимірювання товщини шару покриття можуть бути розділені на дві великі групи: з руйнуванням покриття та без його руйнування. Найбільшу групу серед методів так званого неруйнівного контролю становлять електрофізичні методи, а також методи, основані на використанні відмінностей у фізичних властивостях деталі та її покриття. Серед них: вихрострумові, індуктивні, магнітометричні, радіаційні, індукційні, ємнісні методи.

Вимірювання товщини шару покриття вихрострумовим способом може бути застосоване для вимірювань товщини нанесених на феромагнітні (кольорові) метали ізоляційних покриттів. За способом перетворення товщини у вихідний сигнал розрізняють генераторні (взаємоіндуктивні) та параметричні (індуктивні) вихрострумові перетворювачі. В індуктивних вихрострумових перетворювачах змінне електромагнітне поле, створюване вимірювальною котушкою,  $B_x$  наводить у поверхневому шарі деталі із електропровідного матеріалу вихрові струми. Поле вихрових струмів, взаємодіючи з полем котушки, приводить до зміни її індуктивності  $L$  (та відповідно повного електричного опору), які є мірою вимірюваної товщини. Цей спосіб при його надзвичайній простоті є недосконалим і не застосовується.

У реальних засобах вимірювань товщини вихрострумовим методом використовують звичайно частотний спосіб отримання вимірювальної інформації. Вимірювальна котушка вмикається в LC-контур генератора високої частоти. Залежно від товщини покриття, а також від інтенсивності взаємодії поля вихрових струмів з вимірювальною котушкою більшою або меншою мірою змінюється індуктивність вимірювальної котушки і тим самим вихідна частота  $f_x$  вимірювального автогенератора, значення якої наближено може бути розраховано як

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_0(L_0 - L_{BH})} - \frac{(R_0 + R_{BH})^2}{4(L_0 + L_{BH})^2}},$$

де  $C_0$  - ємність резонансного контуру;  $L_0$  та  $R_0$  - відповідно індуктивність та активний опір вихрострумового перетворювача за відсутності досліджуваного об'єкта;  $L_{BH}$  та  $R_{BH}$  - внесені індуктивність та активний опір, зумовлені впливом вихрових струмів у досліджуваному об'єкті.

Найдосконалішою є двогенераторна схема рис.11.3 (з вимірювальним та опорним генераторами) з формуванням вихідного сигналу у вигляді різниці частот, аналогічно схемі (рис. 11.1,б). За такою структурою побудований вихрострумний вимірювач товщини покриття типу "Радон", призначений для вимірювань товщини діелектричних покриттів, нанесених на струмопровідну основу плоскої, випуклої та увігнутої форм і товщини виробів із діелектрику, які під час їх дослідження ставлять на струмопровідну основу. Прилад має діапазон вимірювань 0... 10 мм та граничну похибку, яка не перевищує 1 %.

Для вимірювань товщини покриття на феромагнітних деталях можна застосовувати індуктивний метод. Первинним перетворювачем такого способу буде індуктивний перетворювач

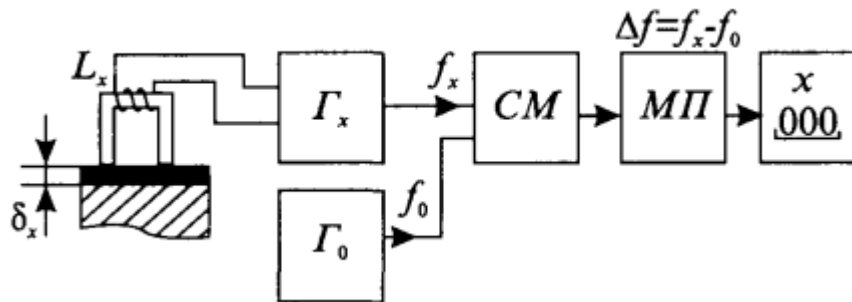


Рисунок 11.3 - Схема індуктивного товщиноміра

Враховуючи, що магнітний опір магнітопроводу значно менший від магнітного опору покриття, еквівалентна індуктивність може бути записана як

$$L_{\text{екв}} \approx \frac{w^2 \mu_0 S_M}{2\delta}$$

де  $w$  - кількість витків вимірювальної обмотки;  $S_M$  - площа перерізу магнітопроводу;  $\delta$  - товщина шару покриття.

Здебільшого застосовують мостові методи вимірювань з використанням робочого індуктивного перетворювача, що розміщений на деталі з покриттям, та ідентичного робочому компенсаційного перетворювача, розміщеного на аналогічній деталі без покриття. Використання компенсаційного перетворювача, увімкненого у сусіднє плече моста, дає змогу усунути вплив зовнішніх чинників, зокрема температури, на результат вимірювань.

У мостовій схемі (рис. 11.4) індикатором вимірюваної величини є магнітоелектричний мілівольтметр, увімкнений до виходу фазочутливої кільцевої схеми випрямлення. Резистор  $R_p$  змінного опору призначений для встановлення нульового показу мілівольтметра при нульовому чи заданому значенні вимірюваної товщини.

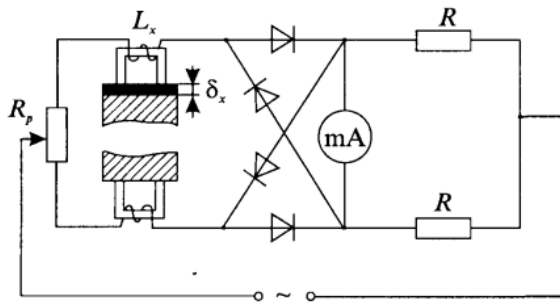


Рисунок 11.4 - Мостова схема індуктивного товщиноміра

Похибка вимірювання товщини покриття з використанням індуктивних перетворювачів лежить у межах 10 %.

Із неруйнівних методів використовують ще, що оснований на використанні взаємоіндуктивних перетворювачів, вихідним інформативним параметром яких є ЕРС наведена у вимірювальній обмотці (рис. 11.5)

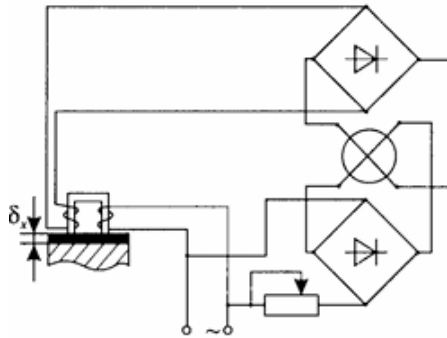


Рисунок 11.5 – Вимірювач товщини гальванічного покриття

$$e_2 = \omega w_2 \Phi = \omega w_2 \frac{I_1 w_1}{Z_M} \approx \frac{\omega w_1 w_2 I_1}{2\delta / (\mu_0 S)}$$

де  $w_1 w_2$  - кількість витків намагнічу вальної та вимірювальної обмоток,  $I_1$  - намагнічу- вальний струм;  $\delta$  - товщина покриття;  $Z_M \approx R_{M\delta}$  - комплексний магнітний опір магнітопроводу  $R_{M\delta} = 2\delta / (\mu_0 S)$ .

На базі такого методу побудовані прилади для вимірювань товщини покриття в межах до 3 мм з похибкою 10... 15 %.

Серед методів руйнівного контролю найпоширенішим є хімічний метод, - оснований на усуненні покриття за допомогою спеціальних хімічних реактивів. За цим методом мірою товщини покриття може бути час усунення покриття або його маса чи різниця між масою покритої деталі та масою деталі після усунення покриття.

### 11.3 Вимірювання рівнів

Вимірювання рівнів наповнення рідин у різних резервуарах та баках займають значне місце в різних галузях промисловості, науки та техніки.

Основними групами рівнемірів є: візуальні (за допомогою водомірного скла); гідростатичні, в яких рівень визначають за значенням тиску рідини на дно резервуара з наступним вимірюванням різниці даного тиску та атмосферного за допомогою диференціального манометра; електро-механічні та механічні, зокрема поплавкові та буйкові; електричні, в яких рівень перетворюється в зміну електричного опору (кондуктометричні) або в зміну ємності (ємнісні).

Найпоширеніші типи рівнемірів, що застосовуються в промисловості:

- Поплавкові;
- Буйкові ;
- Ємнісні.

**Поплавкові рівнеміри.** Принцип роботи поплавкових рівнемірів оснований на відсліджуванні рівня рідини за допомогою поплавка. Поплавок, маючи питому густину, значно меншу, ніж рідина, завжди знаходиться на її поверхні і переміщується з переміщенням вимірюваного рівня рідини. Переміщення поплавка перетворюється у вихідний сигнал відлікових пристроїв, що може здійснюватися як за допомогою звичайних механічних пристроїв, так і з перетворенням переміщення в електричний сигнал за допомогою різних вимірювальних перетворювачів.

Найпростішими є механічні рівнеміри, в яких поплавок підвішений на так званій мірній стрічці. При зміні рівня рідини та відповідному переміщенні мірної стрічки, яка має перфорацію, стрічка входить у зчеплення з виступами мірного шків механічного відлікового пристрою. Відліковий механізм - це десятковий лічильник із трьох або чотирьох барабанів з ціною найменшої поділки 1 мм. Застосовуються такі рівнеміри для вимірювань рівнів рідких нафтопродуктів і мають верхню границю вимірювань до 20 м і абсолютну похибку вимірювання в межах до  $\pm 4$  мм.

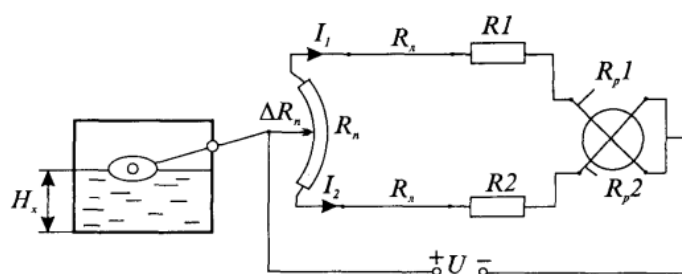


Рисунок 11.6 - Схема поплавкового рівнеміра

На рис. 11.6 наведена принципова схема поплавкового рівнеміра з реостатним перетворювачем переміщення та логометричним вимірювальним приладом для вимірювання рівня пального в баках автомобілів та літаків. Поплавок розміщений в баку з досліджуваним рівнем і механічно зв'язаний з повзунком реостатного перетворювача  $R_n$ . Резистори  $R_1$  та  $R_2$  служать для узгодження параметрів перетворювача та логометра для забезпечення заданого діапазону вимірювань

При зміні досліджуваного рівня та відповідному переміщенні поплавка повзунков реостатного перетворювача, змінюючи співвідношення опорів у колах рамок логометра, змінює і відношення струмів, а тим самим відхилення а стрілки та покази логометра

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

Шкала таких рівнемірів градується в значеннях вимірюваного рівня або в частках максимального рівня, прийнятого за одиницю.

До переваг логометричних кіл належить незмінність показів при коливанні напруги джерела живлення та незначний вплив опору лінії.

Вторинними перетворювачами поплавкових рівнемірів можуть бути також індуктивні чи взаємоіндуктивні перетворювачі переміщень.

**Буйкові (плунжерні) рівнеміри.** Їх робота базується на використанні виштовхувальної сили, що діє на занурене у рідину тіло (буйок) у вигляді циліндра, довжина якого значно більша від його діаметра (рис. 11.7), а питома густина значно більша від питомої густини досліджуваної рідини. Такий буйок механічно з'єднаний з чутливим елементом 2 вторинного перетворювача, а його переміщення обмежується за допомогою пружини 3, закріпленої одним кінцем до верхньої частини буйка, а іншим до нерухомої частини перетворювача. Такий буйок, що вільно підвішений на пружині, є масштабним перетворювачем порівняно великих змін рівня (до 10...20 м) у порівняно невеликі переміщення буйка та чутливого елемента вторинного перетворювача. Залежно від рівня рідини на буйок буде діяти підйомна сила, внаслідок чого пружина стискається, а чутливий елемент, яким може бути, наприклад, плунжер індуктивного чи взаємоіндуктивного перетворювача, переміщується, змінюючи відповідно вихідну індуктивність (повний електричний опір) чи вихідну ЕРС

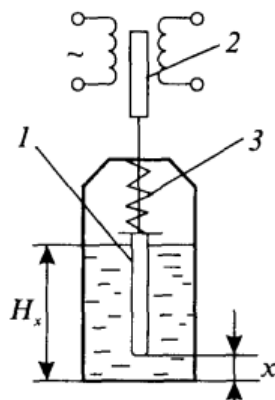


Рисунок 11.7 - Структура буйкового перетворювача рівня рідини

Функцію перетворення буйкового перетворювача можна визначити, враховуючи такі положення. При зануренні буйка в досліджувану рідину на нього буде діяти виштовхувальна сила:

$$F_x = S(H - x)\rho_r g$$

де  $H$  - рівень рідини;  $x$  - переміщення буйка;  $S$  - площа поперечного перерізу буйка;  $\rho_r$  - питома густина рідини;  $g$  - земне прискорення.

Сила пружності пружини змінилася на величину  $F_x = Wx$ , де  $W$  - штивність пружини.

Прирівнявши ці дві сили, одержимо

$$x = H \frac{1}{1 + \frac{W}{\rho_r g S}}$$

Вторинними вимірювальними приладами рівнемірів з буйковим перетворювачем можуть бути прилади типу КПД чи КСД (з компенсаційним вимірювальним колом з диференціально-трансформаторними перетворювачами) (рис. 11.8).

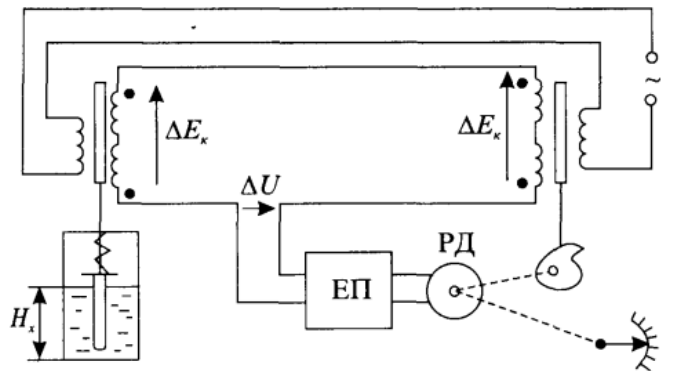


Рисунок 11.8 - Схема буйкового рівнеміра з диференціально- трансформаторними перетворювачами

Останнім часом широко застосовуються буйкові та поплавкові рівнеміри з силовою компенсацією, а також статичного зрівноважувального перетворення (рис. 11.9). Вихідною величиною в таких вимірювачах є струм. Буйкові рівнеміри такого типу з уніфікованим вихідним сигналом 0... 5 мА та 0...20 мА призначаються для вимірювання рівня рідини в технічних місткостях з рівнем заповнюваності до 10...16 м. Їх зведена похибка знаходиться в межах до 1,5 %.

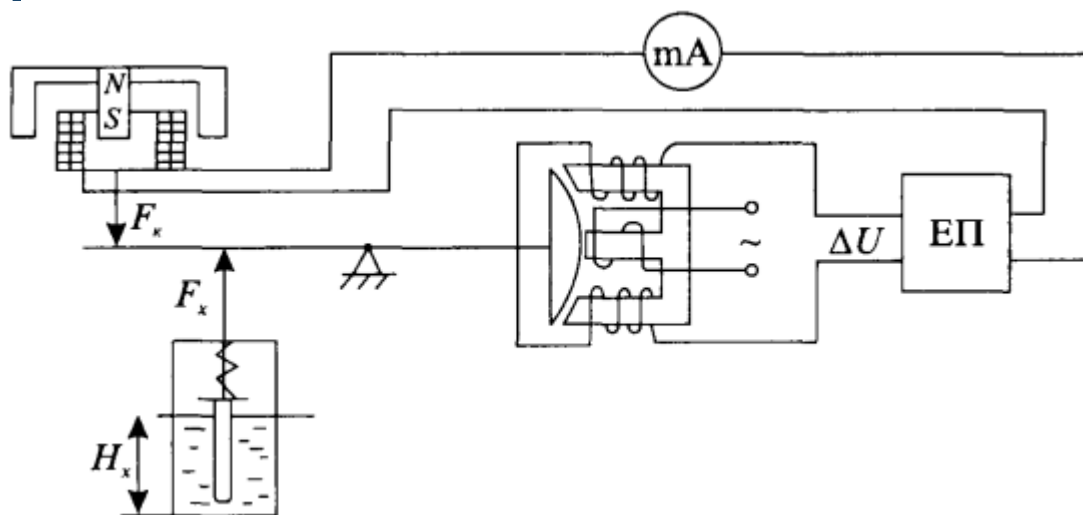


Рисунок 11.9 - Схема буйкового рівнеміра зрівноважувального перетворення

Принцип дії рівнемірів зрівноважувального перетворення такий. При зануренні буйка в досліджувану рідину на нього буде діяти виштовхувальна сила  $F_x$ , що приводить до переміщення буйка.

Це переміщення за допомогою коромисла перетворюється в поворот осердя диференціально-трансформаторного перетворювача. Нерухома частина магнітопроводу виконана у вигляді Ш-подібного осердя. На середньому його стержні намотана первинна намагнічувальна обмотка, що живиться від джерела змінної напруги. Дві ідентичні вимірювальні обмотки, намотані на крайні стержні, утворюють два ідентичні перетворювальні елементи. Обмотки з'єднані послідовно і зустрічно.

Диференціально-трансформаторний перетворювач побудований так, що при нульовому значенні вимірюваного рівня чи деякому його номінальному значенні рухоме осердя займає симетричне щодо обох перетворювальних елементів положення, наведені в них ЕРС будуть однаковими, а їх різниця дорівнюватиме нулю. Зі зміною вимірюваного рівня і відповідним переміщенням рухомого осердя змінюються потоки в окремих перетворювальних елементах і наведені в них ЕРС. З'являється деяка різниця ЕРС, яка подається на підсилювач, вихідна напруга якого після перетворення змінного струму в постійний подається до вимірювальної обмотки зворотного магнітоелектричного перетворювача.

Струм  $I_x$ , що проходить через вимірювальну обмотку, взаємодіючи з полем постійного магніту, створює компенсуючу силу  $F_k$ , спрямовану назустріч силі  $F_x$ . Струм, що протікатиме в момент рівноваги цих сил, буде мірою вимірюваного рівня. Для точніших вимірювань струму  $I_x$  використовують компенсатори постійного струму, що вимірюють спад напруги на вимірювальній котушці опору  $R_0$ .

**Ємнісні рівнеміри** відрізняються універсальністю, високою чутливістю, простотою вимірювального кола, відсутністю рухомих елементів у

зоні вимірюваного рівня. Однією з основних проблем при побудові ємнісних рівнемірів є компенсація змін відносних діелектричних проникностей  $\epsilon_x$  середовища, рівень якого вимірюють, та  $\epsilon_{п}$  повітря між обкладками вимірювального перетворювача в зоні, що не заповнена досліджуваним середовищем. На рис. 11.10 показана схема рівнеміра, в якій передбачене виключення впливу зміни названих діелектричних проникностей за допомогою компенсуючих конденсаторів. Давач рівнеміра (рис. 11.10 а) має робочий конденсатор  $C_x$  та три компенсуючі конденсатори, два з яких ( $C_{п1}$  та  $C_{п2}$ ) знаходяться у повітрі і один ( $C_k$ ) повністю занурений в досліджуване середовище.

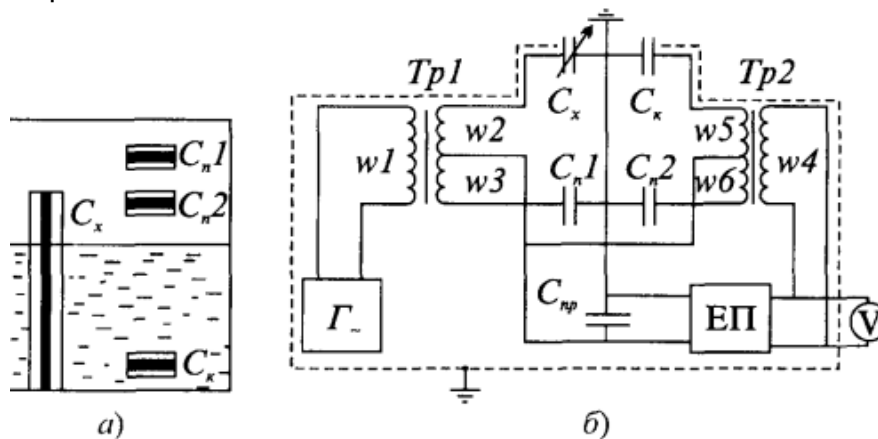


Рисунок 11.10 -Структура давача та схема ємнісного рівнеміра

Вимірювальне коло такого рівнеміра складається з генератора змінної напруги, підсилювача, вольтметра та двох трансформаторів  $Tr1$  та  $Tr2$  і працює в режимі статичного зрівноважувального перетворення. Якщо коефіцієнт підсилення достатньо великий, то можна вважати, що напруга на його вході, зашунтованому паразитною ємністю  $C_{np}$ , буде наближатись до нуля, а це означає, що практично буде дорівнювати нулю сума струмів, які надходять на вхід підсилювача.

Отже, покази вольтметра будуть пропорційними вимірюваному рівню  $H_x$  і не залежатимуть від значення діелектричної проникності  $\epsilon_x$

$$U_B = kH_x U,$$

де  $U_B$ ,  $U$  відповідно напруга на виході генератора  $G$ .

#### 11.4 Вимірювання відстаней між об'єктами

Найточнішими методами вимірювань відстаней між об'єктами є спектрометричні методи, зокрема локаційний метод, оснований на вимірюванні часу проходження вимірюваної відстані променем, швидкість якого відома і залишається незмінною під час вимірювання. Практично для реалізації локаційного методу можна використати всі види випромінювань,

але найпоширенішими є методи та засоби радіолокації, оптичної та акустичної локації. Локаційний метод, що базується на використанні звукових та ультразвукових хвиль, називають ехо-звуковим.

У локаційних засобах джерело випромінювання та приймач знаходяться на одній границі вимірюваного розміру, а на іншій границі - спеціальний відбивач або замість останнього використовується границя об'єкта, відстань до якого визначається.

Радіолокаційний та оптичний локаційний методи застосовуються для вимірювань великих відстаней - від десятків та сотень метрів до багатьох мільйонів кілометрів.

Акустична локація використовується в твердих, рідких та газоподібних середовищах для вимірювань розмірів та відстаней від одиниць міліметрів до декількох кілометрів, тобто в діапазоні, в якому застосування радіо- та оптичної локації ускладнено через необхідність вимірювати дуже малі часові інтервали ( $10^9 \dots 10^{11}$  с), що зумовлено великою швидкістю розповсюдження електромагнітних хвиль, або внаслідок швидкого загасання електромагнітних коливань у рідких та твердих середовищах.

Швидкість розповсюдження звукових та ультразвукових коливань в повітрі дорівнює близько 333 м/с, в морській воді 1500 м/с, а в металах 3000... 10 000 м/с, тобто на 4...6 порядків менше від швидкості розповсюдження електромагнітних коливань, що дає змогу використовувати акустичну локацію для вимірювань малих відстаней.

Є два основні способи реалізації локаційного методу: імпульсний та модуляційний (фазовий). В першому способі використовується випромінювання у вигляді коротких імпульсів, а в другому - безперервне модульоване випромінювання, фаза якого містить інформацію про вимірювану відстань. На рис. 11.11 наведені спрощені структурні схеми оптичних локаційних світловіддалемірів, основаних на використанні імпульсного (рис. 11.11, а) та модульованого (рис. 11.11, б) випромінювань.

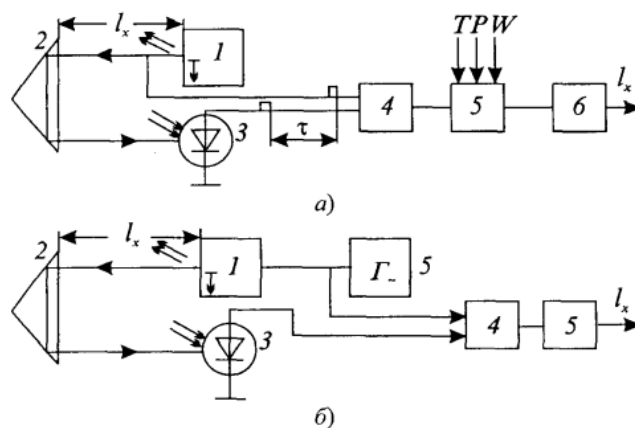


Рисунок 11.11 - Схеми реалізації локаційного методу вимірювань відстаней

В імпульсних локаторах випромінювання у вигляді короткого імпульсу від джерела випромінювання - лазера 1 спрямовується до об'єкта 2, відстань до якого вимірюють. Відбитий від об'єкта імпульс приймається оптоелектронним чутливим елементом 3. Інтервал часу, протягом якого імпульс проходить подвійну вимірювану відстань, визначається вимірювачем інтервалів часу 4. Якщо відома швидкість розповсюдження променя, вимірювана відстань  $l_x$  обчислюється за допомогою обчислювального пристрою 5 відповідно до формули  $l_x = \tau v/2$  і безпосередньо відраховується відліковим пристроєм 6.

Швидкість розповсюдження електромагнітного випромінювання, зокрема оптичного, в повітряному середовищі визначається за формулою  $v = c/n$ , де  $c=299\,792\,458$  м/с - швидкість світла у вакуумі;  $n$  - показник заломлення світла в середовищі, який залежить від його температури, тиску та вологості.

У сучасних височастотних світловіддалемірах одночасно з вимірюванням відстаней здійснюються допоміжні вимірювання метеорологічних параметрів середовища (температури **T**, тиску **P** та вологості **W**) в декількох точках вздовж вимірюваної відстані, результати яких вводяться в мікропроцесор 5 для уточнення значення швидкості світла в даному середовищі в момент вимірювання відстані. Цей спосіб надзвичайно трудомісткий і використовується лише при дуже точних метрологічних вимірюваннях відстаней до декількох кілометрів, наприклад, в установках для відтворення одиниці довжини на ділянці 50... 1000 м.


Інший спосіб уточнення швидкості світла у цьому середовищі полягає у використанні двохвильового дисперсійного методу, при якому показник заломлення  $n$  визначають, вимірюючи відстані при двох різних довжинах хвиль із застосуванням двочастотного лазера. Цей спосіб використовується в світловіддалемірах для точних вимірювань великих відстаней (до сотень км).

У фазових (модуляційних) локаційних віддалемірах (рис. 11.11, б) використовується неперервне випромінювання лазера 1, модульоване за інтенсивністю синусоїдним сигналом з частотою  $f_m$  від генератора 5. Як інформативний параметр для визначення часу проходження променем подвійної вимірюваної відстані  $l_x$  приймається кут фазового зсуву між напругою на виході приймача випромінювання 3 та модульовальною напругою, який вимірюється за допомогою фазометра 4 і здійснюється на частоті модуляції.

Вимірювана відстань визначається в обчислювальному пристрої 5 за формулою:

$$l_x = \frac{c}{2\pi f_m} \left( N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right)$$

де  $N$  - повна кількість фазових циклів;  $\Delta\varphi$  - кут фазового зсуву в границях неповного фазового циклу.



Отже, при вимірюваннях фазовими локаційними віддалемірами відстаней, більших від половини довжини хвилі модуляційного сигналу, необхідно визначити повну кількість фазових циклів і кут фазового зсуву в границях неповного (останнього) циклу. Частота модуляції лежить, звичайно, в межах 10... 100 МГц.

За допомогою оптичної локації та лазерів відстань від Землі до відбивачів, установлених на Місяці, була визначена з точністю до 2...6 см, тобто з похибкою меншою за  $2 \cdot 10^{-8}\%$ .

## 11.5 Вимірювання механічних напружень

Найпоширенішим способом визначення механічних напружень є вимірювання деформації поверхні досліджуваного об'єкта. Діапазон вимірюваних деформацій дуже широкий - від часток мікрометра в металах та твердих пластмасах до десятків сантиметрів у зразках еластичних матеріалів з великим видовженням.

Найпростішим та найпоширенішим методом вимірювань деформацій є так званий тензометричний метод, в якому як первинні перетворювачі деформації використовують тензорезистори. Металеві тензорезистори застосовують під час вимірювань відносних деформацій від 0,002 до 1...2 %, напівпровідникові - до 0,1...0,2 %, навісні металеві - до 10 %, а еластичні (гнучкі кавчукові трубки, заповнені електролітом) - до 30...50 %. Тензорезистори практично безінерційні і використовуються для вимірювань, зокрема, змінних деформацій в діапазоні частот до 100 кГц.

Для вимірювання деформацій чи величин, попередньо перетворених у деформацію пружного перетворювального елемента, тензорезистор наклеюють на досліджувану деталь. Для температур до 200°C застосовують бакеліто-фенольні клеї (БФ), бакелітовий лак, а для вищих температур - жаростійкі кремнійорганічні цементи та цементи на основі рідкого скла.

Особливістю приклеюваних тензорезисторів є те, що вони не можуть бути переклеєні з об'єкта на об'єкт. Тому дійсна функція перетворення робочого тензорезистора не може бути визначена, а для її оцінки знаходять функцію перетворення аналогічного, так званого градуовального тензорезистора з цієї партії. А оскільки властивості окремих тензорезисторів із певної їх партії, а також умови їх приклеювання загалом дещо різні, то відзначається деяка неоднозначність дійсної та номінальної функцій перетворення. Досвід свідчить, що похибка від неідентичності функцій перетворення при акуратному приклеюванні тензорезисторів з достатньо однорідної партії не перевищує 1,5 %. Вихідним інформативним параметром тензорезисторів є зміна їх опору і тому здебільшого вимірювальними колами тензорезистивних перетворювачів є мостові вимірювальні кола. Тензорезистор може бути увімкненим в одне з плеч моста, в два плеча або мостове коло може бути складене повністю із тензорезисторів.

Оскільки відносна зміна опору тензорезисторів дуже мала ( $\varepsilon_R \ll 1\%$ ), то суттєвий вплив на результат вимірювань може мати температура довкілля. Отже, необхідно передбачити температурну компенсацію. Зокрема, якщо використовують мостове коло з одним робочим тензорезистором (рис. 11.12, а), то для температурної компенсації необхідний інший неробочий тензорезистор  $R_{TK} = R_0$ , аналогічний робочому  $R_T$ , який був би в однакових температурних умовах з робочим. Тоді зміна опорів двох ідентичних (робочого та компенсаційного) тензорезисторів, зумовлена зміною температури довкілля при незмінному значенні вимірюваної деформації, не викликає зміни вихідної напруги. Дійсно, якщо, наприклад  $\varepsilon_R = 0$  та  $R_2 = R_3 = R$

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \frac{R_{T0}(1 + \varepsilon_t)R_3 - R_{T0}(1 + \varepsilon_t)R}{[R_{T0}(1 + \varepsilon_t) - R_{T0}(1 + \varepsilon_t)]2R} = 0$$

де  $R_{T0}$  - опір тензорезистора при температурі  $0^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon_t$  - температурний коефіцієнт опору тензорезистора.

Якщо таке мостове коло при відсутності вимірюваної деформації буде в рівновазі, тобто  $R_2R_3 = R_2R_{TK}$  внаслідок дії вимірюваної деформації і відповідно зміни опору робочого тензорезистора на  $\Delta R_T$  рівновага порушується, а вихідна напруга за умови, що внутрішній опір джерела живлення нехтівно малий, буде дорівнювати

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \frac{R_{T0}(1 + \varepsilon_R)R_3 - R_2R_{TK}}{[R_{T0}(1 + \varepsilon_R) - R_{TK}(R_2 + R_3)]} = 0$$

де  $\varepsilon_R = \Delta R_T/R_{T0}$  - відносна зміна опору тензорезистора;  $R_T = R_{T0}(1 + \varepsilon_R)$  - функція перетворення робочого тензорезистора.

Для симметричного моста, коли  $R_{T0} = R_{TK}$ , а  $R_2 = R_3$ , матимемо

$$U_{\text{вих}} = 0,25U_{\text{вх}} \frac{\varepsilon_R}{1 + 0,5\varepsilon_R}$$

Як видно з останнього виразу, функція перетворення такого мостового кола, тобто залежність  $U_{\text{вих}}$  від  $\Delta R$  чи  $\varepsilon_R$  нелінійна. Однак при невеликих змінах  $R_T$  (у металевих тензорезисторах ці зміни не перевищують 1%), коли  $\varepsilon_R < 0,01$ , можна вважати

$$U_{\text{вих}} = 0,25U_{\text{вх}}\varepsilon_R$$

Оскільки відношення відносної зміни опору  $\varepsilon_R = \Delta R_T / R_{T0}$  до відносної деформації  $\varepsilon_l = \Delta l_T / l$  характеризується коефіцієнтом відносної тензочутливості  $k$ , то залежність вихідної напруги від вимірюваної деформації запишеться як

$$U_{\text{вих}} = 0,25 U_{\text{вх}} k \varepsilon_R.$$

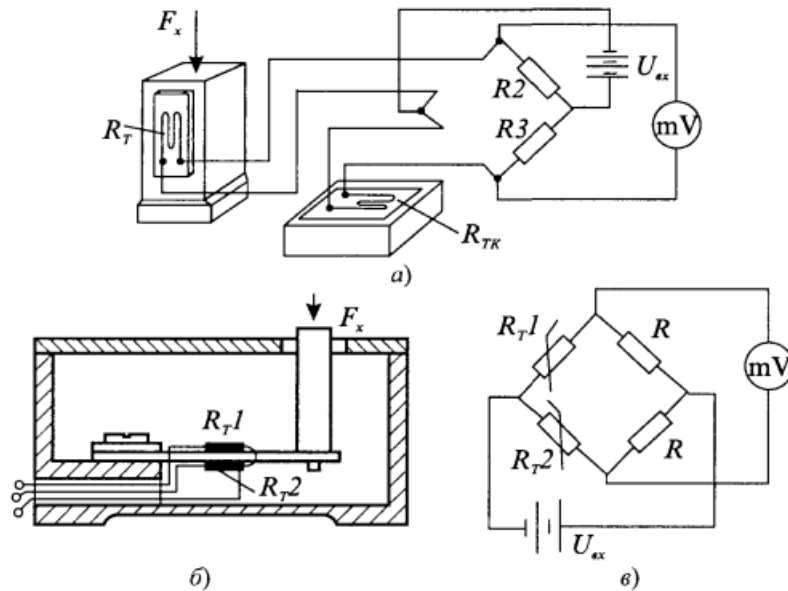



Рисунок 11.12 - Схеми увімкнення тензорезисторів у мостові кола

Якщо первинними перетворювачами сили (тиску) в деформацію є консольні (мембранні) перетворювальні елементи, то як робочі можна використати два ідентичні тензорезистори, наклеєні з протилежних сторін чутливого елемента так, що один сприймає деформацію розтягу, а інший деформацію стиску, то можливе диференціальне їх увімкнення в мостове коло. У цьому випадку температурна похибка також виключається, а чутливість мостового кола збільшується вдвічі.

Дві пари диференціальних тензорезисторів, які утворюють повний тензометричний міст, забезпечують найкращу корекцію температурних похибок і в чотири рази збільшують чутливість.

Практично застосовуються складніші схеми тензометричних мостів, де, крім основних (робочих) тензорезисторів, увімкнені також регульовальний резистор для встановлення початкового значення діапазону вимірювань (найчастіше нульового значення вихідної напруги), температурозалежний резистор для компенсації зміни чутливості схеми від зміни температури довкілля, резистор для регулювання і встановлення номінальної чутливості. Термозалежний резистор повинен мати добрий тепловий контакт з досліджуванним об'єктом (чи перетворювальним пружним елементом), на якому наклеєні робочі тензорезистори. Для цього він приклеюється до досліджуваного об'єкта (пружного елемента) за допомогою електроізоляційного клею з доброю теплопровідністю.



Крім незрівноважених мостових кіл, у тензометрії можуть бути використані і зрівноважені мостові кола. До переваг останніх слід віднести незалежність показів від зміни напруги джерела живлення, відсутність похибки від нелінійності функції перетворення, що відзначається в незрівноважених мостових колах. Недоліком зрівноважених мостових кіл є низька швидкодія при ручному зрівноважуванні чи складність вимірювального засобу при автоматичному зрівноважуванні.

Визначення механічних напружень всередині тіла досліджуваного об'єкта за результатами вимірювань відносних деформацій на його поверхні розраховують на підставі основних співвідношень між механічними напруженнями та деформацією згідно з законом Гука, які загалом можуть бути записані як:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x + \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y + \mu(\sigma_x + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z + \mu(\sigma_x + \sigma_y)],\end{aligned}$$


де  $E$  - модуль пружності;  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона;  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  та  $\varepsilon_z$  - головні поздовжні деформації, що виникають у відповідній точці пружного ізотропного матеріалу в границях пружних деформацій при однорідному об'ємно-напруженому стані в напрямі відповідних осей;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ : - відповідні головні напруження.

## 11.6 Вимірювання механічних сил та тиску

Переважає більшість силувимірювальних пристроїв (динамометрів) оснований на методі перетворення вимірюваної сили в механічні напруження в матеріалі пружного перетворювального елемента і його деформацію, які за допомогою тензо- резистивних, індуктивних, п'єзоелектричних, магнітопружних чи інших вторинних перетворювачів перетворюються в електричний сигнал або зміну вихідного електричного параметра.

Залежно від значення вимірюваної сили як первинні перетворювачі можуть використовуватись стержневі пружні елементи, пружні кільця, балкові пружні елементи. Вторинними перетворювачами динамометрів з механічними пружними перетворювачами сили в деформацію є, переважно, тензорезистивні перетворювачі, а вимірювальні кола – мостові. Такі динамометри призначаються для вимірювань з похибкою 1.. 2 %.

Незважаючи на порівняно низьку точність (сумарна похибка вимірювання сили становить 2... 3 %), широко застосовуються для вимірювань великих сил ( $10^5$ ...  $10^6$  Н) в складних умовах динамометри з магнітопружним перетворювальним елементом, які відрізняються простотою конструкції, високою надійністю, значною потужністю вхідного сигналу. Магнітопружні перетворювачі виготовляють, переважно, диференціальними. Один



з перетворювальних елементів є робочим, а ідентичний йому інший перетворювальний елемент на який не діють вимірювальні зусилля, служить для компенсації початкової індуктивності робочого перетворювального елемента, а також для компенсації впливу зовнішніх чинників, зокрема температури довкілля, частоти джерела живлення.

Основою п'єзоелектричних динамометрів є п'єзоелектричні перетворювачі сили в електричний заряд. Труднощі, що виникають під час побудови п'єзоелектричних динамометрів, зумовлені електростатичною природою зарядів п'єзоелектричного перетворювача: їх малим значенням, тенденцією до швидкого стікання через опір ізоляції та вхідний опір підсилювача. Надзвичайно мала вихідна потужність при великому опорі п'єзодавача вимагає використання високочутливих підсилювачів з дуже великим вхідним опором. Тому певний час п'єзодинамометри застосовувались лише для вимірювання змінних сил (тисків). Використання в п'єзодинамометрах підсилювачів заряду дає змогу в тисячі разів зменшити стікання заряду, а отже, тривало підтримувати значення вихідного сигналу, що дало можливість створити п'єзодинамометри і для вимірювань сталих сил.

До переваг п'єзодинамометрів належить їх висока чутливість, висока швидкодія. Зведена похибка п'єзодинамометрів знаходиться в межах 1 %.

Широкий діапазон вимірюваних тисків - від часток Па до майже  $10^{10}$  Па зумовив і велику різноманітність методів та засобів їх вимірювань. Значна частина методів основана на попередньому перетворенні тиску в механічне напруження, деформацію чи переміщення за допомогою пружних перетворювальних елементів з наступним вимірюванням механічного напруження, деформації чи переміщення. В інших засобах використовуються фізичні ефекти, які дають змогу безпосередньо перетворювати вимірюваний тиск в електричну величину, наприклад, у заряд, як у п'єзоелектричних манометрах, чи в зміну вихідного електричного опору в результаті баричного тензоефекту.

Для роботи в системах автоматичного вимірювання абсолютного, надлишкового чи гідростатичного тиску, а також різниці тисків двох досліджуваних середовищ та їх перетворення в уніфікований вихідний сигнал, промисловістю випускається багато моделей вимірювальних перетворювачів. Діапазон перетворюваних тисків цих перетворювачів знаходиться в границях від 0,25 кПа до 100 МПа з допустимими основними похибками 0,25; 0,5 чи 1 % та нормованим вихідним струмом 0...5 мА та 4...20 мА.

В ємнісних перетворювачах тиску чутливими елементами, що перетворюють вимірюваний тиск в переміщення, є мембрани. Одночасно вони можуть бути використані як рухомі електроди. Ємнісні перетворювачі звичайно мають верхню границю 200...800 Па при чутливості 0,5... 1,0 пФ/Па та початковій ємності 10...20 пФ. Основна їх похибка становить 1... 2 %.

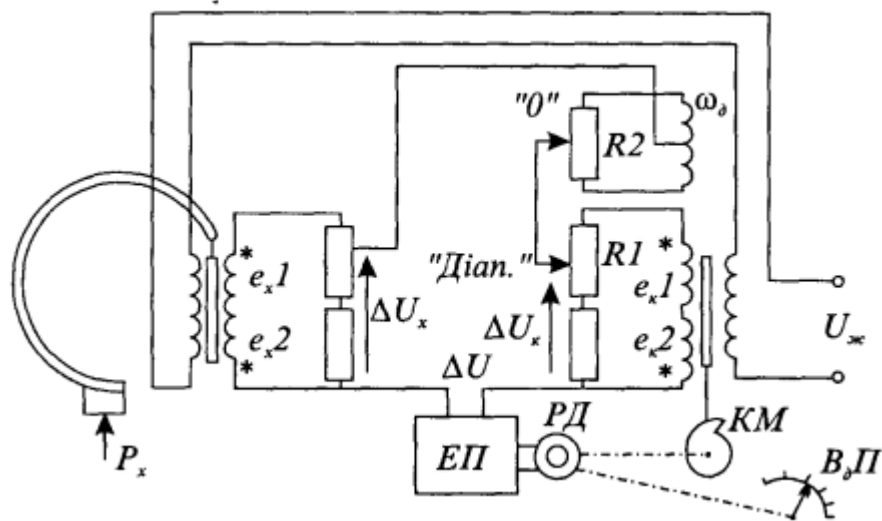


Рисунок 11.13 - Схема манометра з диференціально-трансформаторними перетворювачами

Для вимірювань тиску з попереднім його перетворенням в переміщення широко застосовуються вторинні прилади з диференціально-трансформаторними вимірювальними колами: як показуючі типу КПД, так і самописні типу КСД. На рис. 11.13 наведена спрощена схема манометра з первинним перетворювачем тиску в переміщення у вигляді одновиткової трубчатой пружини (трубки Бурдона) та вторинного приладу КСД. Переміщення вільного кінця трубки Бурдона, пропорційне до вимірюваного тиску, передається рухомому осердю вхідного диференціально-трансформаторного перетворювача ДТП-1. Прилад КСД містить також аналогічний вхідному компенсуючий диференціально-трансформаторний перетворювач ДТП-2, осердя якого переміщається за допомогою профільного кулачкового механізму КМ, механічно зв'язаного з віссю реверсивного двигуна РД, а також електронний фазочутливий підсилювач.


Для налаштування системи та забезпечення взаємності первинних перетворювачів може бути передбачена можливість регулювання вихідної напруги ДТП для кінцевого значення діапазону вимірювання.

Секції вихідних обмоток обох ДТП включені послідовно, результуюча ЕРС на виході ДТП дорівнює:

$$\begin{aligned}\Delta E_x &= e_{x1} - e_{x2}; \\ \Delta E_k &= e_{k1} - e_{k2};\end{aligned}$$

Якщо положення рухомих осердь вхідного та компенсуючого перетворювачів будуть різними, то різними будуть також  $\Delta E_x$  та  $\Delta E_k$ , а, отже,  $\Delta U_x$  та  $\Delta U_k$ , а на вхід електронного підсилювача ЕП буде прикладена напруга

$$\Delta U = \Delta E_x - \Delta E_k.$$



Підсилений різницевий сигнал  $\Delta U$  подається на обмотку керування реверсивного двигуна РД і викликає обертання його ротора в такому напрямку, щоб переміщення осердя компенсувального ДТП-2 викликало зменшення різницевої напруги  $\Delta U$  аж поки вона дорівнюватиме нулеві.

Оскільки переміщення осердя вхідного ДТП1 може бути (для певних типів перетворювачів тиску в переміщення) нелінійною функцією вимірюваного тиску, а функція перетворення ДТП2 лінійна, профіль кулачкового механізму вторинного приладу підбирають таким, щоб лінеаризувати загальну функцію перетворення і отримати лінійну шкалу.

Основна похибка таких манометрів не перевищує 1,5 %.

### 11.7 Вимірювання крутних моментів

Прилади для вимірювань крутних моментів називаються торсіометрами.

Для вимірювання крутних моментів найчастіше використовують методи, основані на перетворенні вимірюваного крутного моменту в деформацію (механічні напруження) пружного елемента, виконаного у вигляді суцільного чи плоскотілого валу (торсіона), спіральних пружин, підвісів чи розтяжок. Деформація (механічне напруження) пружного елемента перетворюється в електричний сигнал за допомогою тензорезистивних, індуктивних, магнітопружних та інших перетворювачів.

Тангенційне напруження  $\tau$  на поверхні суцільного валу, який знаходиться під дією крутного моменту  $M_{кр}$ , зв'язане з останнім залежністю

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p},$$

де  $W_p = \frac{\pi R^2}{2}$  – полярний момент опору круглого валу радіусом  $R$ .

Для вимірювань тангенційних напружень можна використати тензорезистори, наклеєні безпосередньо на валах досліджуваних об'єктів, а якщо це неможливо, - на пружних елементах, з'єднаних штивно з робочим досліджуваним валом. Тензорезистори наклеюють у напрямі найбільших тангенційних напружень, тобто під кутом  $45^\circ$  до осі валу. У цьому випадку чутливий елемент тензорезистора буде зазнавати деформації

$$\varepsilon = \frac{\tau}{2G},$$

де  $G$  - модуль зсуву матеріалу досліджуваного валу.

Розміщенням тензорезисторів під кутом  $45^\circ$  до осі валу та під кутом  $90^\circ$  один до одного, а також попарно на діаметрально протилежних сторонах валу, як на рис. 11.14, з наступним під'єднанням їх у схему одинарного моста, забезпечується не тільки темпе температурна компенсація, але і усувається вплив деформації згину валу на результат вимірювань.

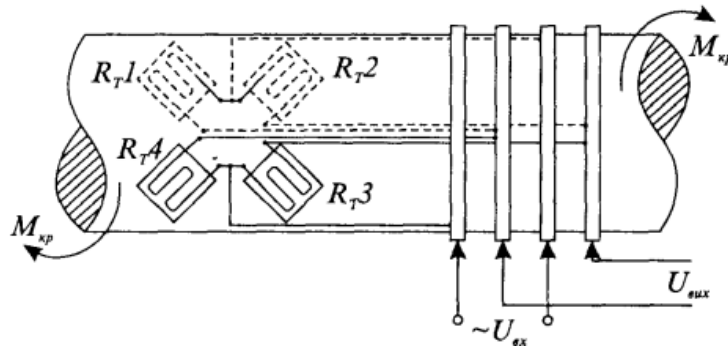


Рисунок 11.14 - Вимірювання крутних моментів

Якщо використовують чотири тензорезистори, які попарно сприймають деформацію різних знаків, вихідна напруга мостового кола

$$U_{вих} = U_{вх} k \varepsilon = U_{вх} k \frac{\tau}{2G} = U_{вх} k \frac{8M_{кр}}{\pi D^2 G}$$

Звідки

$$M_{кр} = \frac{\pi D^2 G U_{вих}}{8k U_{вх}}$$

де  $k$  - коефіцієнт відносної тензочутливості тензорезистора.

Одним з важливих елементів торсіометра для вимірювання крутних моментів валів, що обертаються, є струмознімач, що з'єднує тензорезистори з електричним вимірювальним колом. Його виготовляють у вигляді контактної кільця, насадженого на вал, та контактних щіток (рис. 11.14). Значний вплив на результат вимірювань у таких випадках можуть мати варіації перехідних опорів контактів та контактні термо-ЕРС, що виникають внаслідок нагрівання контактів через тертя в них. Для зменшення цього впливу кільця та щітки виготовляють з матеріалів, що у парі мають малий перехідний опір та малу термо-ЕРС, а також застосовують схемні рішення. Наприклад, якщо чотири тензорезистори з'єднати у замкнене кільце, а струмознімальні кільця під'єднати до вершини моста, тоді опори контактів будуть додаватись лише з опорами джерела живлення та індикатора, а їх вплив на результат вимірювань буде незначним. Для усунення впливу паразитних контактних термо-ЕРС вимірювальне коло живлять від джерела змінної напруги.

Схема безконтактного торсіометра для вимірювань крутного моменту валів, що обертається, показана на рис. 11.15. На валу 1 чотири тензорезистори  $R_T$ , розміщені попарно з обидвох сторін вала, утворюють тензорезистивний міст. Живлення мостового кола і підімкненого до його виходу перетворювача напруга-частота (ПНЧ) 2 здійснюється від блока живлення 3 через трансформатор 4 з рухомою вторинною обмоткою, яка знаходиться на рухомому валу. Первинна обмотка УГі трансформатора підключена до джерела 5 синусоїдної напруги з частотою 5... 10 кГц. Протягом півперіоду вихідної напруги ПНЧ, коли ключ 5 розімкнений, напруга, що наводиться у вторинній обмотці трансформатора, випрямляється, стабілізується і подається на тензометричний міст. Напруга розбалансу моста надходить на вхід ПНЧ, який служить для перетворення напруги розбалансу в пропорційну їй частоту  $f_x$ .

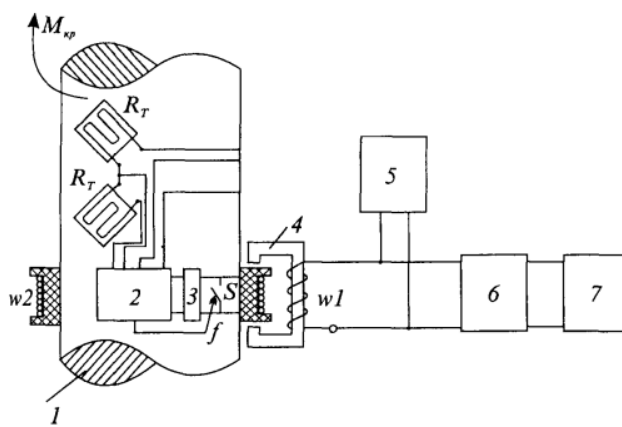



Рисунок 11.15 - Схема безконтактного торсіометра

Сигнал з виходу ПНЧ у вигляді частотно-модульованої змінної напруги керує ключем 8, який з частотою  $f_x$  замикає і розмикає вторинну обмотку  $w_2$  трансформатора, викликаючи модуляцію напруги на обмотці  $w_1$ . Ця напруга після амплітудного демодулятора 6 подається на аналоговий або цифровий частотомір 7. Для несучої частоти 5 кГц чутливість приладу до відносної зміни опору тензорезисторів становить  $\Delta f_x/\varepsilon = 5000$  Гц%.

Похибка вимірювання крутних моментів за допомогою наклеєних тензорезисторів може бути зведена до 1... 1,5 % при попередньому градуюванні вимірювального приладу з наклеєними тензорезисторами. Без такого градуювання похибка може сягати 5... 10 %.

При вимірюванні великих крутних моментів застосовують магнітопружні трансформаторні перетворювачі, в яких як магнітопружний елемент, магнітна проникність якого змінюється зі зміною механічних напружень (крутного моменту) використовується сам сталевий вал. Перевагою такого методу є те, що як намагнічувальна, так і вимірювальна (вторинна)



обмотки перетворювача розміщені на нерухомому статорі, чим забезпечується висока надійність. Похибка вимірювання крутних моментів за допомогою серійних приладів такого типу не перевищує 1,5 %.

### 11.8 Вимірювання параметрів лінійного руху

Для вимірювань параметрів лінійного руху відносними методами широко використовуються контактні методи та засоби вимірювань лінійних та кутових переміщень, зокрема, метод обкочування, різні спектрометричні методи. Суть методу обкочування полягає в тому, що для вимірювань переміщень (пройденого шляху) транспортними засобами додаються дискретні переміщення, які визначаються довжиною обводу кола. Тут лінійне переміщення обводу кола перетворюється в кутове переміщення для подальшого перетворення за допомогою контактного “щупа” чи індукційного перетворювача в одиничні імпульси (наприклад, за кожний оберт кола) та додавання лічильником імпульсів).

Поширеними методами вимірювань параметрів лінійного руху є так звані інерціальні методи. В основі застосування цих методів лежить фундаментальна властивість тіл - властивість інерції. За допомогою інерціальних засобів вимірювань вимірюють лінійне прискорення твердого тіла та інші зв'язані з прискоренням параметри лінійного руху. Внаслідок еквівалентності інерційної та гравітаційної мас вихідний сигнал подібних засобів вимірювань пропорційний, строго кажучи, не інерційному прискоренню, а так званому позірному (уявному) як геометричній різниці інерційного та гравітаційного прискорень. Коли вимірюються горизонтальні прискорення, а прискорення вільного падіння спрямоване у цьому випадку перпендикулярно до вимірюваного, впливом гравітаційного прискорення нехтують.

В основі методів вимірювань параметрів лінійного руху твердого тіла лежить вимірювання сили інерції, пропорційної його масі та прискоренню:

$$F_{ін} = ma.$$

Для вимірювань лінійного прискорення вибирають деяку “інерційну” масу  $m$ , з'єднану з досліджуваним об'єктом і вимірюють її силу інерції. Для вимірювань змінних прискорень з частотами від одиниць герц до десятків кілогерц найчастіше застосовуються п'єзоелектричні перетворювачі, для вимірювань сталих та низькочастотних прискорень - перетворювачі інерційної дії.

Для вимірювань прискорень поступального руху з похибкою 1... 5 % використовують звичайні давачі прямого перетворення маятникового або пружинного типів. В маятникових акселерометрах інерційна маса підвішена на штивному стержні і може повертатися довкола осі кріплення (як маятник), а протидійний момент може створюватись спіральною пружи-

ною чи електромеханічним способом у системах зрівноважувального перетворення. В пружинних перетворювачах інерційна маса кріпиться на вільному кінці пружини, яка і створює протидійний момент.

Для вимірювань малих лінійних прискорень від часток ( $g = 9,8\text{м/с}^2$  - прискорення вільного падіння) до декількох  $g$  застосовуються маятникові перетворювачі. Вторинними перетворювачами в таких засобах звичайно є диференціальні ємнісні перетворювачі, увімкнені у відповідні плечі незрівноваженого трансформаторного моста змінного струму. Для підвищення точності маятникових акселерометрів вони будуються за схемою зрівноважувального перетворення. Похибка таких акселерометрів може бути зведена до 0,05... 0,1 %, а поріг чутливості  $10^4 g$ .

Принцип дії маятникового перетворювача зрівноважувального перетворення пояснює рис. 11.16. За наявності вимірюваного прискорення, на інерційну масу буде діяти сила інерції  $F_x = m \frac{d^2 x}{dt^2}$ , що призводить до відхилень від початкових значень ємностей перетворювальних елементів ємнісного диференціального перетворювача і розбалансу мостового кола. Напруга розбалансу моста після підсилення подається на вхід фазочутливого випрямляча, а його вихідна напруга надходить на вхід магнітоелектричного зворотного перетворювача, який розвиває компенсувальну силу  $F_k$ , спрямовану назустріч силі інерції. Покази міліамперметра можуть бути проградуєвані в одиницях вимірюваної величини.

Якщо вимоги до точності вимірювань невисокі, використовують маятникові перетворювачі прямого перетворення, зокрема з диференціальними ємнісними перетворювачами. В таких акселерометрах мірою вимірюваної величини є напруга розбалансу моста, у який ввімкнений диференціальний ємнісний перетворювач. Недоліком таких схем є дуже малий діапазон вимірювань через нелінійність функції перетворення, а похибка таких акселерометрів знаходиться в границях декількох процентів.

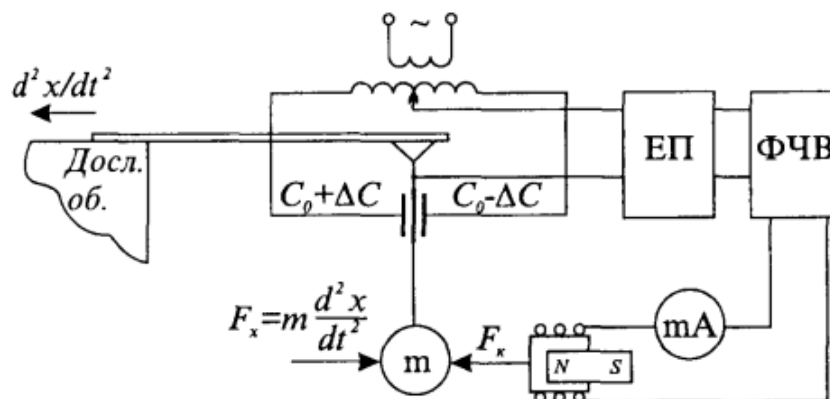


Рисунок 11.16 - Схема акселерометра зрівноважувального перетворення

На рис. 11.17 наведені схеми пружинних акселерометрів з реостатним та ємнісним вторинними перетворювачами. Інерційна маса 1 за допомогою плоских пружин 2 сумарною пружністю  $W$  підвішена в корпусі перетворювача, який кріпиться до досліджуваного рухомого тіла. Заспокоєння здійснюється за допомогою демпфера 3. Якщо наявне вертикальне прискорення, на інерційну масу буде діяти сила інерції  $F_{ін} = -m \frac{d^2x}{dt^2}$  яка викликати переміщення інерційної маси відносно корпусу перетворювача. Проти-дійний момент, створений пружинами,  $F_{пр} = W_y$ . В усталеному положенні  $F_{ін} = F_{пр}$ , звідки

$$y = -\frac{m}{W} \frac{d^2x}{dt^2}$$

Використовуються такі акселерометри в транспортній авіації для вимірювань переобтяжних прискорень. Діапазон вимірю таких акселерометрів знаходиться в границях (0,1 .... 100 g).

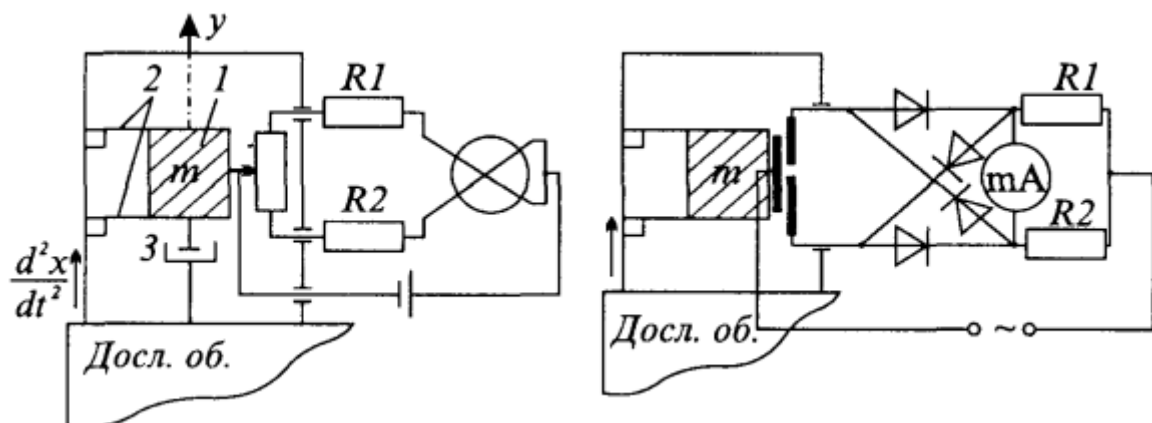


Рисунок 11.17 - Схеми пружинних акселерометрів з реостатним та ємнісним вторинними перетворювачами

### 11.9 Вимірювання параметрів вібрацій

Під вібрацією розуміють механічні коливання об'єкта у певних границях. Параметрами вібрацій є амплітуда, швидкість та прискорення центру маси досліджуваного об'єкта. Коливання можуть мати характер:

- детермінованих процесів, тобто процесів, які підпорядковуються певному математичному закономірності і повторюються в часі;

- стохастичних процесів, тобто безладних процесів, які не описуються математично і визначаються випадковою послідовністю різних причин.

Визначимо тільки параметра детермінованих, а точніше синусоїдних процесів.

Для визначення параметрів вібрацій при синусоїдних коливаннях досліджуваного об'єкта можуть бути використані методи та засоби вимірювань параметрів лінійного руху. Однак повинні бути враховані особливості роботи цих засобів у динамічному режимі.

Інерціальна система для перетворення амплітуди вібрацій повинна мати власну частоту коливань  $\omega_0$ , значно нижчу від частоти вібрації  $\omega$  досліджуваного об'єкта.

Якщо  $\omega \ll \omega_0$  інерційна маса буде коливатися з амплітудою

$$A_{a.max} = X_{max} \frac{\omega^2}{\omega_0^2},$$

пропорційно до віброприскорення досліджуваного об'єкта.

Здебільшого для вимірювань амплітуди вібрацій, швидкості та прискорення використовують один і той же первинний перетворювач (інерціальну систему) з використанням для визначення окремих параметрів інтегрально-диференціального зв'язку між ними.

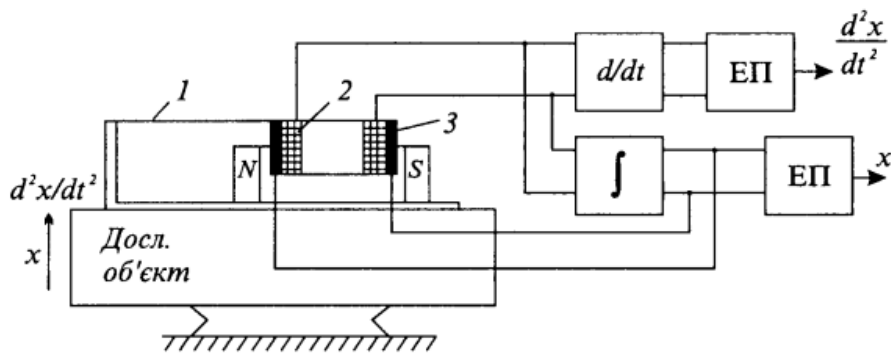


Рисунок 11.18 - Схема індукційного віброакселерометра

Прикладом такого віброакселерометра є індукційний віброакселерометр (рис. 11.189), принцип роботи якого такий. На плоскій пружині рис 11.18. 1 закріплена вимірювальна котушка 2, яка одночасно виконує роль інерційної маси. До корпусу віброперетворювача прикріплений постійний магніт, а сам перетворювач кріпиться до досліджуваного об'єкта. Якщо  $\omega \gg \omega_0$  котушка буде коливатися за законом  $y(t) = -X_{max} \sin(\omega t - 180^\circ)$ , в той час як коливання постійного магніту, як і досліджуваного об'єкта, описуються рівнянням  $x_{m(t)} = X_{max} \sin \omega t$ . Отже, коливання вимірювальної котушки щодо магніту будуть здійснюватись за синусоїдним законом з амплітудою  $2 X_{max}$ .

Внаслідок коливань вимірювальної котушки в полі постійного магніту в котушці буде наводитись ЕРС, пропорційна швидкості коливань,

$$e = k \frac{dy}{dt} = 2kX_{max} \cos \omega t.$$

Отже, вихідною величиною індукційного віброперетворювача є швидкість коливного руху досліджуваного об'єкта. Для одержання показів вихідного вимірювального приладу в одиницях вимірюваного прискорення використовують проміжну диференціальну ланку, а для побудови віброметра - інтегрвальну ланку (рис. 11.18).

Для розширення частотного діапазону в бік низьких частот та підвищення точності використовується зворотний зв'язок. Сигнал з виходу інтегратора подається на вхід компенсаційної котушки 3, механічно з'єднаної з вимірювальною котушкою. Компенсаційний струм, взаємодіючи з полем постійного магніту, створює компенсувальну силу, спрямовану назустріч силі інерції, зменшуючи амплітуду коливань інерційної маси при наближенні частоти коливань досліджуваного об'єкта до резонансної частоти інерціальної системи.

Розглянутий віброакселерометр призначений для роботи в частотному діапазоні 20...500 Гц, похибка не перевищує 1 %.

Найпростішим конструктивно є пружинний віброметр (акселерометр) з первинним перетворювачем у вигляді інерційної маси 1, закріпленої на кінці плоскої пружини 2 (рис. 11.19), по обидва боки від якої наклеєні тензорезистивні перетворювальні елементи, які сприймають деформацію пружини при її коливанні. Для віброметра забезпечують  $\omega \gg \omega_0$ , тоді інерційна маса буде коливатись з амплітудою, що дорівнює амплітуді коливань досліджуваного об'єкта. Два робочі тензорезистори, один з яких сприймає деформацію розтягу, а інший - деформацію стискування, увімкнені в схему подільником напруги (рис. 11.19, б). Вимірювальне коло живиться від джерела постійної напруги. Для виключення сталої складової у вихідній напрузі використовують роздільний конденсатор С.

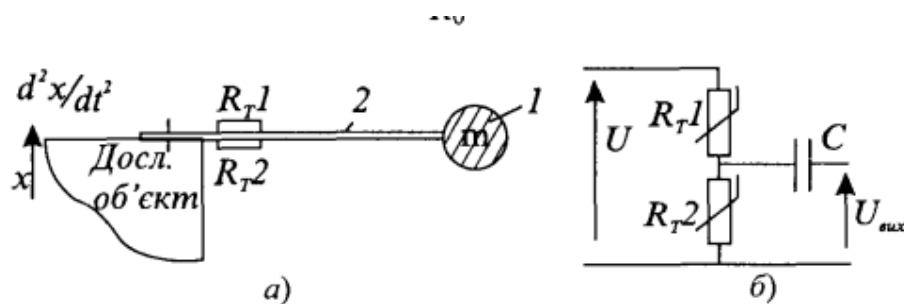


Рисунок 11.19 - Принципу дії тензорезистивного акселерометра

Для контролю параметрів динамічних процесів переважно в області підвищених частот, широко застосовують п'єзоелектричні перетворювачі рис. 11.20. Існує багато різновидів таких перетворювачів, які відрізняються один від одного видом використовуваної деформації п'єзоелемента, способом його кріплення до інерційної маси тощо.

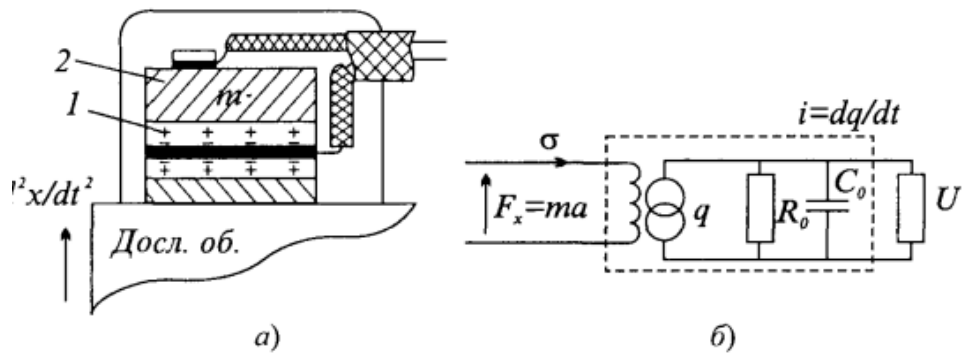


Рисунок 11.20 - Конструкція та принцип дії п'єзоелектричного акселерометра

Мала потужність при великому внутрішньому опорі п'єзоелектричного перетворювача зумовлює певні вимоги до вторинних перетворювачів, тобто - до вимірювальних підсилювачів, основною з яких є необхідність дуже високого вхідного опору підсилювача. Серед схем підсилювачів, які можуть бути використані, можна виділити два різновиди. Це - електрометричні з вхідним опором до  $10^{14}$  Ом і так звані підсилювачі заряду. Сьогодні останні майже повністю витісняють електрометричні.

Підсилювачі заряду (рис. 11.21, б) - це підсилювачі сталої напруги з коефіцієнтом підсилення більше ніж 20000, в коло зворотного зв'язку яких увімкнені конденсатор  $C_{зв}$  та опір  $R_{зв}$  (опір  $R_1$ , служить для стабілізації вихідної напруги і разом з  $R_0$  та  $C_0$  параметрами п'єзоперетворювача визначає сталу часу  $\tau = RC$ ).

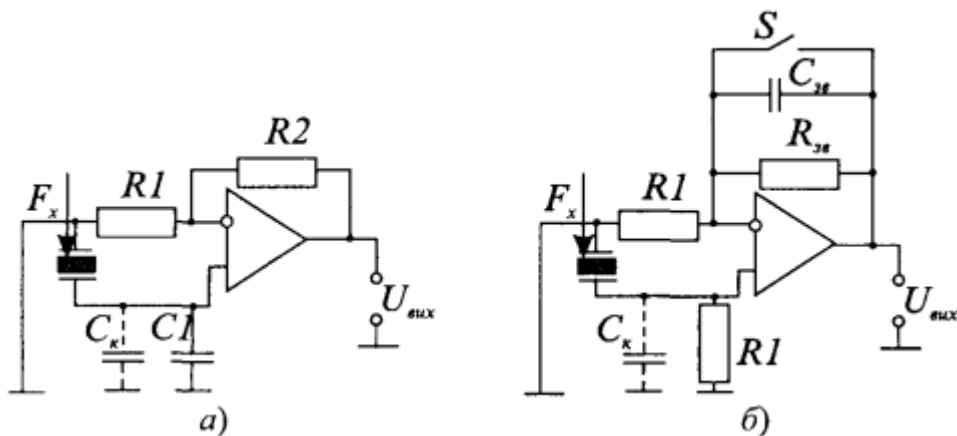



Рисунок 11.21 - Вимірювальні кола акселерометра

Ключ  $S$  в колі зворотного зв'язку служить для швидкого встановлення нульової початкової напруги на виході підсилювача. Замиканням ключа розряджається конденсатор  $C_{зв}$ , який при великих сталих часу кола зворотного зв'язку розряджався б дуже повільно. Чутливість більшості підсилювачів заряду лежить у границях  $0,1 \dots 10$  мВ/пКл.



Особливою сферою застосування п'єзоелектричних перетворювачів віброприскорень є досліджування імпульсних процесів, наприклад, під час випробування вогнепальної зброї, експериментальних досліджень транспортних засобів. Через малі розміри та малу масу вони працюють практично без зворотної дії на досліджуваний об'єкт і тому придатні також для досліджень об'єктів малих геометричних розмірів (малих мас).

### 11.10 Вимірювання параметрів обертового руху

Швидкість обертання елементів машин, пристроїв та агрегатів є однією з характеристик досліджуваного об'єкта. Нерідко вона визначає динамічні та теплові напруження в машинах. Технічні тахометри повинні забезпечувати похибку вимірювання звичайно не більше ніж 1,5...2 %, а при вимірюванні швидкості обертання в енергетичних установках ця похибка не повинна перевищувати 0,3...0,5 %.

Швидкість обертання визначається кількістю обертів за хвилину  $n$  (об/хв), що зв'язана з частотою обертання  $f$ , як

$$f = \frac{n}{60}; n = 60f.$$

Найпоширенішими є такі методи вимірювання частоти обертання: відцентрові механічні, в яких чутливий елемент реагує на відцентрову силу, що розвивається незрівноваженими масами рухомого вала; електричні постійного, змінного чи імпульсного струму, основані на залежності генерованої напруги від частоти обертання, а для змінного та імпульсного струму - залежність частоти струму від частоти обертання; магніто-індукційні, основані на залежності наведених в металевому тілі вихрових струмів від частоти обертання; індукційні, основані на законі електромагнітної індукції; фотоелектричні, що базуються на модуляції світлового потоку елементами обертання; стробоскопічні та інші.

Відцентрові тахометри прості та надійні. Вони застосовуються для вимірювань кутових швидкостей включно до 1000 об/хв. Їх основними недоліками є недистанційність, порівняно велика похибка (до 10 %), низький поріг чутливості.

Первинними перетворювачами електричних (генераторних) тахометрів є тахогенератори - електричні мікромашини, що працюють в режимі генератора і є перетворювачами швидкості обертання ротора в пропорційний електричний сигнал.

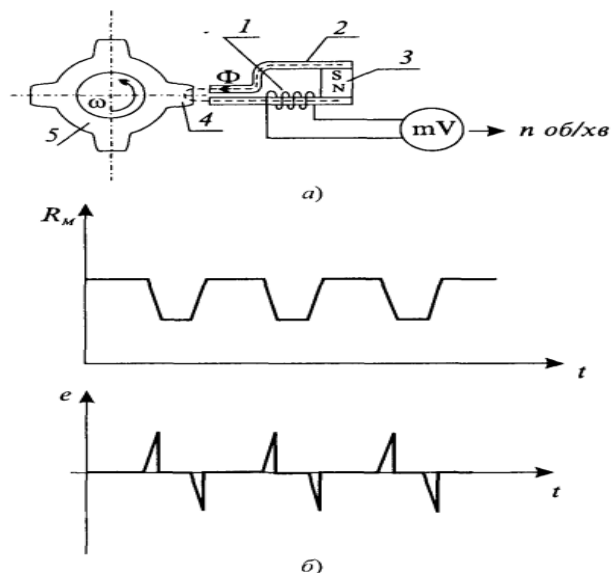


Рисунок 11.22 - Індукційний тахометр

Серед індукційних тахометрів особливе місце займають імпульсні індукційні тахометри. Первинний перетворювач такого тахометра (рис. 11.22, а) має вимірювальну обмотку 1, розміщену на сталевому ярмі 2, через яке замикається магнітний потік постійного магніту 3. Рухомою частиною є феромагнітний зубчастий диск 5, який кріпиться до вала, оберти якого вимірюють.

При обертанні вала зубчастий виступ 4 диска (індуктора), проходячи біля розімкненої частини ярма, зменшує повітряний проміжок між рухомим феромагнітним диском та нерухомою частинами магнітопроводу, що призводить до зміни магнітного потоку і наведення у вимірювальній обмотці ЕРС.

Для наведеної конструкції імпульсного індукційного перетворювача ЕРС, що виникає у вимірювальній обмотці, буде мати вигляд двополярних імпульсів, частота яких дорівнюватиме частоті проходження виступів диска (зубців) попри розімкнену частину ярма, тобто частоті обертання валу

$$f = \frac{pn}{60}$$

де  $p$ - кількість виступів індуктора,  $n$  – частота обертання валу бо/хв.

Крім частотного інформативного параметра, інформативним параметром вихідного сигналу може бути і вихідна ЕРС.

Похибки індукційних тахометрів з частотним виходом визначаються лише похибкою вимірювання частоти.

В індукційних тахометрах з вихідним параметром у вигляді ЕРС, яка пропорційна до швидкості переміщення котушки лише за умови, що індукція  $B$  постійна впродовж всього шляху переміщення. Непостійність індукції викликає виникнення похибки. Похибка таких тахометрів також багато

в чому залежить від струму, який споживає вторинний перетворювач. Проходячи по вимірювальній обмотці індукційного перетворювача, цей струм створює магнітне поле, яке згідно з правилом Ленца спрямоване назустріч до напрямку основного поля і має розмагнічувальну дію. Внаслідок цього сумарна індукція зменшується, зменшується і ЕРС перетворювача.

### 11.11 Прилади з гіроскопічними перетворювачами

Особливу групу приладів для вимірювань параметрів обертового руху становлять прилади з гіроскопічним первинним перетворювачем. Ці прилади характеризуються автономністю, високою точністю, що і забезпечило їм широке застосування, зокрема, в навігації.

В основу принципу дії гіроскопа закладена властивість тіл, що обертаються з великою швидкістю (сотні обертів за секунду), зберігати незмінним при відсутності зовнішніх моментів напрям вектору моменту кількості руху (моменту імпульсу) в інерціальній системі відліку, що дає можливість використати цей напрям як опорний. Іншою важливою властивістю гіроскопа є здатність здійснювати прецесію вектору моменту імпульсу при дії на ротор гіроскопа зовнішнього моменту сил. Прикладом гіроскопа може бути звичайна дзиґа.

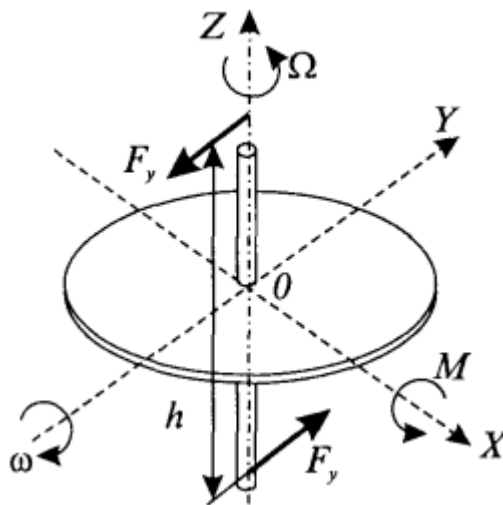


Рисунок 11.23 - Принцип дії гіроскопу

Основні положення щодо принципу дії гіроскопа пояснює рис. 11.23.

Практичне застосування знайшли гіроскопи з горизонтальною віссю обертання. Гіровузол такого перетворювача здебільшого є трифазним асинхронним двигуном з короткозамкнутим ротором, що закріплений в рамках карданного підвісу (створені конструкції гіроскопів, в яких карданний підвіс замінений електростатичними або магнітними підвісами). Якщо літальний апарат, на якому знаходиться гіроперетворювач, здійснює поворот, то виникає момент сил, що діє на гіроскоп і рамка разом з гіроскопом

буде відхилятися відносно площини, в якій виконується поворот літального апарата, на деякий кут. Кут відхилення осі гіроскопа буде мірою кутової швидкості розвороту літального апарата.

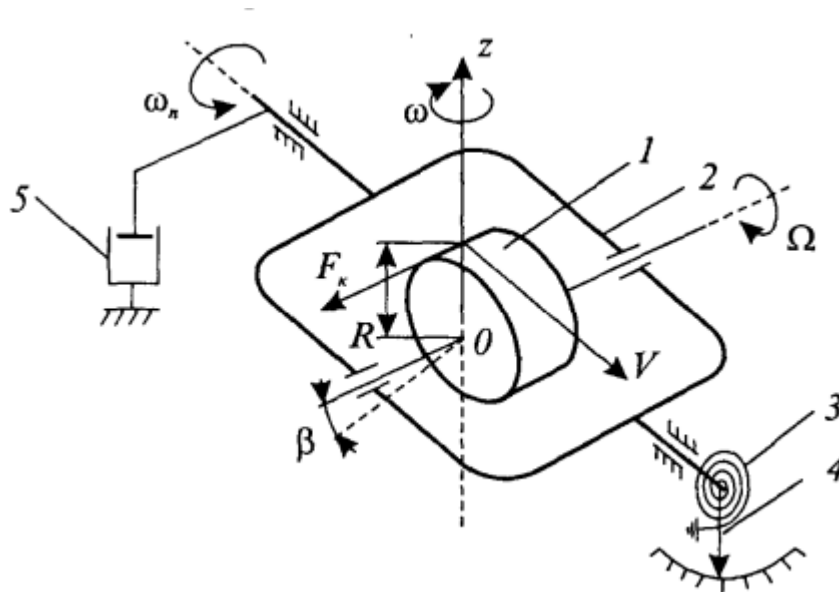


Рисунок 11.24 - Принцип дії гіротахометра

Прилади для вимірювання таких кутових швидкостей називають гіротахометрами. Принцип роботи такого гіротахометра ілюструє рис. 11.24. Тут позначені ротор 1, що обертається з кутовою швидкістю  $\Omega$ , рамка 2, пружина 3 для створення протидіючого моменту, відліковий пристрій 4 (в сучасних гіротахометрах стрілка відлікового пристрою може бути замінена рухомими елементами реостатного, індуктивного чи взаємоіндуктивного параметричного перетворювача для перетворення переміщення в зміну електричного опору чи індуктивності) та заспокоювач 5. При розвороті літального апарата відносно осі 2 з кутовою швидкістю гіроскоп, реагуючи на швидкість повороту, прецесує, а його вісь буде відхилятися на деякий кут  $\beta$  оскільки гіроскопічний момент не зрівноважиться протидіючим моментом пружини (тут  $W$  - питомий протидіючий момент пружини)..

Робота гіротахометрів базується на інерційному принципі, тому вони не потребують механічного зв'язку із зовнішнім середовищем, відносно якого відбувається поворот. Ця властивість гіротахометрів робить їх дуже зручними для вимірювання швидкості повороту рухомих об'єктів, які, крім вимірюваної кутової швидкості, мають ще й швидкість поступального руху відносно Землі або іншої базової поверхні.

Окрім класичних гіроскопів, можуть використовуватись гіроскопи без носія моменту кількості руху (лазерні гіроскопи) або гіроскопи з корпускулярними носіями моменту кількості руху (так звані електронні, протонні, атомні гіроскопи).

## **Висновки**

**Геометричні параметри:** Вимірювання геометричних розмірів (лінійних, кутових, товщини покриттів) має ключове значення в багатьох галузях промисловості та науки. Методи вимірювання поділяються на контактні та безконтактні (електромеханічні, електрофізичні, спектрометричні), з перевагою сучасних цифрових технологій.

**Механічні зусилля:** Основні методи вимірювання механічних зусиль базуються на реєстрації деформацій, змін властивостей перетворювачів (електричних, магнітних) або зрівноважувальних методів. Широке застосування отримали тензорезистивні та п'єзоелектричні методи.

**Параметри руху:** Методи вимірювання поділяються на абсолютні (інерціальні) та відносні. Сучасні засоби включають контактні (тахометри, акселерометри) та інерціальні системи (сейсмічні, гіроскопічні прилади).

**Покриття та товщина:** Вимірювання товщини покриттів виконуються руйнівними та неруйнівними методами, включаючи вихрострумові, ємнісні та магнітометричні.


**Рівень рідин:** Основні методи включають поплавкові, буйкові та ємнісні рівнеміри, які широко використовуються в промисловості для моніторингу рівнів рідин у резервуарах.

**Точність і похибки:** Кожен метод вимірювання має свої переваги та обмеження. Для мінімізації похибок важливо враховувати вплив зовнішніх факторів, таких як температура та вібрації.

**Актуальність:** Інтеграція сучасних мікропроцесорних технологій у вимірювальні прилади забезпечує автоматизацію процесу та високу точність вимірювань.

## **Контрольні запитання до теми 11**

1. Що таке геометричні параметри і як вони класифікуються?
2. Які основні методи використовуються для вимірювання лінійних розмірів?
3. Як принцип роботи ємнісного профілометра допомагає вимірювати мікронерівності поверхонь?
4. Які похибки можуть виникати під час вимірювання параметрів шорсткуватості?
5. Як поділяються методи вимірювання товщини покриттів, і які їхні переваги та недоліки?
6. У чому суть вихрострумового методу вимірювання товщини покриттів?
7. Як працюють поплавкові та буйкові рівнеміри?
8. Які особливості ємнісних рівнемірів і які переваги вони мають?
9. Що таке локаційний метод вимірювання відстаней і як він реалізується?
10. Як вимірюється відстань за допомогою фазових локаційних віддалемірів?

- 
11. У чому суть тензометричного методу вимірювання деформацій?
  12. Як мостові схеми використовуються у вимірюванні механічних напружень?
  13. Які типи тензорезисторів використовуються і які їхні основні характеристики?
  14. Як компенсується температурний вплив під час використання тензорезисторів?
  15. Як вимірюються сили та тиск за допомогою пружних елементів і вторинних перетворювачів?
  16. Що таке магнітопружні та п'єзоелектричні перетворювачі, і як вони використовуються у вимірювальних системах?
  17. Як працюють манометри з диференціально-трансформаторними перетворювачами?
  18. У чому полягає принцип роботи торсіометрів для вимірювання крутного моменту?
  19. Як тензорезистори розташовуються для вимірювання крутного моменту на обертових валах?
  20. Які проблеми виникають під час використання контактних струмомознімачів у торсіометрах і як їх можна вирішити?

### **Використана література до теми 11**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
3. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: навчально-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабіченка. Харків: Мірошніченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.
4. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, метрологія та управління якістю: навчальний посібник / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.
5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
6. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. [та ін.] Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. 496 с.
7. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.



8. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 521 с.

9. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та за-соби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.

## ТЕМА 12. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Термометри розширення, манометричні термометри, термоелектричні, електричні термометри опору, пірометри, тепловізори Висновки.

Температурою називають ступінь нагрівання речовини. Це твердження про температуру ґрунтується 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 передавання тепла від одного тіла до іншого, тобто в стані теплової рівноваги, температури тіл однакові.

Прилади для вимірювання температури поділяють залежно від використовуваних ними фізичних властивостей речовин на такі групи:

- термометри розширення ( $-190\dots+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), що базуються на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм;
- манометричні термометри ( $-160\dots+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), що працюють за принципом зміни тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкненому (не змінному) об'ємі під час нагрівання або охолодження цих речовин;
- термометри опору ( $-200\dots+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), що ґрунтуються на властивості металевих провідників під час нагрівання змінювати їх електричний опір;
- термоелектричні термометри ( $-50\dots+1\ 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), які працюють на властивості різнорідних металів і сплавів утворювати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу, що залежить від температури спаю;
- пірометри ( $-30\dots+6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), які працюють за принципом вимірювання випромінюваної енергії нагрітими тілами.

### 12.1 Термометри розширення

Фізичну властивість тіл змінювати свій об'єм залежно від нагрівання широко використовують для вимірювання температури. На цьому принципі заснований пристрій рідинних скляних і дилатометричних термометрів, які з'явилися дуже давно і використовувалися для створення перших температурних шкал.

У рідинних термометрах, побудованих на принципі теплового розширення рідини в скляному резервуарі, за робочі речовини використовують ртуть і органічні рідини - етиловий спирт, толуол тощо.

Найширшого застосування набули ртутні термометри, що мають порівняно з термометрами, заповненими органічними рідинами, істотні переваги: великий діапазон вимірювання температури, за якого ртуть залишається рідкою, незмочення скла ртуттю, можливість заповнення термометра хімічно чистою ртуттю через легкість її одержання тощо. За нормального атмосферного тиску ртуть перебуває в рідкому стані за температур від  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$  (точка замерзання) до  $357\text{ }^{\circ}\text{C}$  (точка кипіння) і має 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 °С.

Рідинні термометри, виготовлені зі скла, є місцевими показувальними приладами. Вони складаються з резервуара з рідиною, капілярної трубки, приєднаної до резервуара і закритої із протилежного кінця, шкали і захисної оболонки.

### **Ртутні термометри.**

Ртутні термометри за призначенням поділяють на промислові (технічні), лабораторні й 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 під час зміни температури ртутні термометри мають майже рівномірну шкалу.

Недоліками ртутних термометрів є їх крихкість, неможливість дистанційного передавання і автоматичного запису показань, значна 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, сферу місцевого контролю і лабораторні вимірювання.

### **Дилатометричні термометри.**

До дилатометричних термометрів належать стрижневий 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. 12.1 а) має закрити з одного кінця трубку 1, що розміщена у вимірювальному середовищі й виготовлена з матеріалу з більшим коефіцієнтом лінійного розширення. У трубку вставлений стрижень 2, що прилягає до її дна важелем 3, з'єднаним із пружиною 4. Стрижень виготовлений із матеріалу з малим коефіцієнтом розширення. Під час зміни температури трубка змінює свою довжину, що призводить до переміщення в ній стрижня, який зберігає майже постійні розміри і з'єднаний за допомогою важеля 3 із вказівною стрілкою приладу.

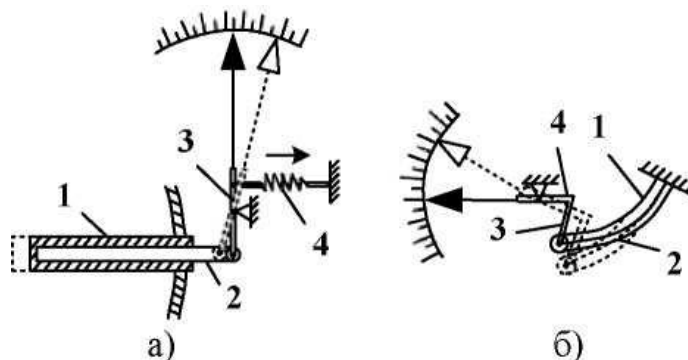


Рисунок 12.1 - Дилатометричні термометри: а) стрижневий; б) пластинчастий

Пластинчастий термометр (рис. 12.1 б) складений 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, величину якого за допомогою тяги 3, важеля 4 і з'єднаної з ним стрілки зазначають за шкалою приладу. Під час збільшення температури пластинка вигинається у бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення.

Дилатометричні термометри не знайшли поширення як самостійні прилади, а використовують, головним чином, як чутливі елементи в сигналізаторах температури. Потрібно відзначити, що пластинчасті термометри іноді застосовують для компенсації впливу змінної температури навколишнього повітря на показання інших приладів, у які вони вбудовані.

## 12.2 Манометричні термометри

Конструктивно вони складаються з теплоприймача - балончика 1, в якому знаходиться термометрична речовина, манометра 3 і металевого капіляра, що їх поєднує 2 (рис. 12.2).

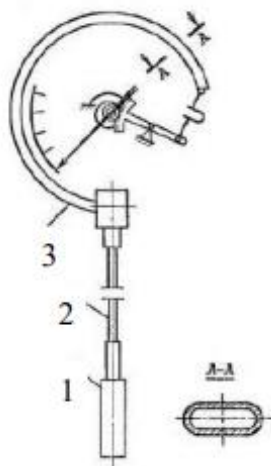


Рисунок 12.2 - Схема манометричного термометра

Всю систему приладу (термобалон, капіляр, манометрична пружина) заповнюють робочою речовиною. Щодо робочої речовини розрізняють газові, рідинні та парорідинні (конденсаційні) манометричні термометри.

Термобалон розміщують у зоні вимірювання температури. Під час нагрівання термобалона тиск робочої речовини всередині замкненої системи збільшується. Збільшення тиску сприймає манометрична трубка (пружина), яка через передавальний механізм впливає на стрілку або перо приладу.

Термобалон приладу зазвичай виготовляють із нержавіючої сталі, а капіляр - з мідної або сталевий трубки внутрішнім діаметром 0,1-0,5 мм. Залежно від призначення приладу довжина капілярної трубки може бути

різною (до 60 м). Для захисту від механічних пошкоджень капіляр розміщують у захисну оболонку.

Манометричні термометри широко застосовують у хімічних виробництвах. Вони прості за будовою, надійні в роботі й за відсутності електроприводу діаграмного паперу - вибухо- і пожежобезпечні.

Шкалу манометра градуують в одиницях температури. Манометричними термометрами вимірюють температуру в межах від  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Під час вимірювання температури агресивних середовищ або продуктів у апаратах, що працюють під час високого тиску, термобалон манометричного термометра встановлюють у захисній гільзі.

### 12.3 Термоелектричні термометри

Первинним перетворювачем (датчиком) термоелектричного термометра є термопара, що складається з двох провідників або напівпровідників А і Б з різною роботою виходу електронів. Принцип дії термопари заснований на термоелектричному ефекті, який полягає в тому, що в замкненому ланцюзі, який складається з двох або декількох різнорідних провідників, виникає електричний струм (термо-ЕРС), якщо хоча б два місця з'єднання (спаю) провідників мають різну температуру. Для одержання порівняно високих значень термо-ЕРС провідники підбирають так, щоб у парі один із них створював додатну, а інший - від'ємну термо-ЕРС.

Один із спаїв із температурою  $t$  є гарячим або робочим, а температуру  $t_0$  іншого спаю (холодного) підтримують сталою.

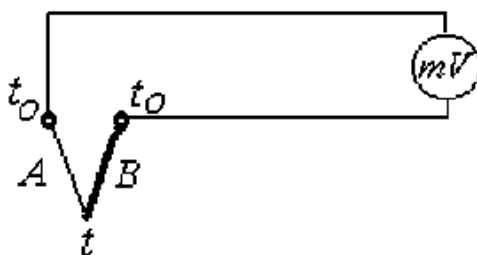


Рисунок 12.3 - Схема під'єднання термопари

Для під'єднання вимірювального приладу необхідно розімкнути ланцюг термопари (рис. 12.3).

Як вимірювальні прилади (вторинні) в термоелектричних термометрах використовують мілівольтметри і потенціометри.

Термоелектричні термометри, що набули практичного застосування, поділяють за матеріалами термоелектродів на дві групи: із благородних (платина, платинородій) і неблагородних металів або сплавів (хромель-алюмелевий та хромель-копелевий сплави). Термометри з термоелектро-

дами із благородних металів і сплавів застосовують в основному для вимірювання температури вищої ніж 1 000 °С, тому що вони мають високу термостійкість.

Перевагами термоелектричних термометрів є: великий діапазон вимірювання, висока чутливість, незначна інерційність, відсутність стороннього джерела електричного струму і легкість здійснення дистанційного передавання показань.

## 12.4 Термопари опору

Для вимірювання температури широко використовують електричні методи, засновані на зміні електричної провідності металів (термометри опору) і напівпровідників (термістори).

Металеві і напівпровідникові резистори, що використовують для вимірювання температури за зміною їх опору, називають також терморезисторами.

На рисунку 12.4 показана одна з конструкцій металевого термометра опору. Для виготовлення таких термометрів використовують хімічно чисті метали, що мають додатний високостабільний температурний коефіцієнт опору, лінійну залежність опору від температури, гарну відтворюваність властивостей та інерційність впливам довкілля. До таких металів насамперед належить платина. Також поширеними є мідні термометри опору, а також вольфрамові й нікелеві.

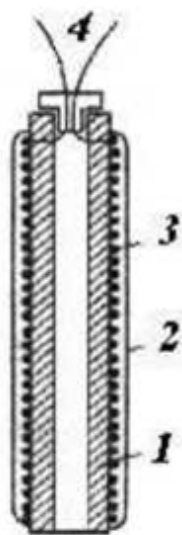


Рисунок 12.4 - Конструкція металевого термометра опору:  
1- керамічний каркас; 2- покриття із глазури; 3- біфілярна обмотка проводом діаметром 0,03 мм або 0,05 мм; 4 - вивідні кінці

На відміну від металевих напівпровідникові резистори- термістори - характеризують експоненціальною залежністю опору від температури. Одна з конструкцій термісторного перетворювача температури наведена

на рисунку 12.5. Завдяки малим порівняно з термометрами опору розмірами термістори менш інерційні. Однак нелінійність характеристики і технологічний розкид параметрів термісторів ускладнюють отримання лінійних шкал термометрів і їх взаємозамінність, необхідну під час широкого застосування термометрів. Щоб лінеаризувати шкалу термісторного термометра, використовують спеціальні коригувальні ланцюги.

Температурна межа вимірювань термістора на оксидній кераміці становить 300 °С, тоді як межа платинового термоопору досягає 850 °С.

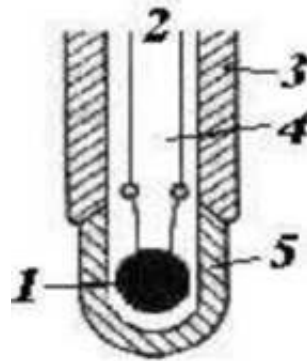


Рисунок 12.5 - Конструкція термістора:


1 - термістор; 2 - з'єднувальні провідники; 3 - металевий кожух;  
4- кварцовий пісок; 5 - скляний наконечник

Для вимірювання опорів у техніці широко застосовують мостові схеми: рівноважений і нерівноважений міст, а також логометри.

## 12.5 Пірометри

Пірометри застосовують для вимірювання температури тіл діапазоном від -30 °С до +6000 °С. 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 підлягає впливу високої температури і не змінює температурне поле, тому що перебуває поза вимірювальним середовищем.

Із підвищенням температури нагрітого тіла інтенсивність його теплового випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини швидко зростає. Під час нагрівання до 500 °С тіло випромінює невидимі інфрачервоні промені великої довжини хвилі, проте подальше збільшення температури викликає появу видимих променів меншої довжини, завдяки яким тіло починає світитися. Спочатку розпечене тіло має темно-червоні кольори. Через підвищення температури і появу променів, довжина хвилі яких поступово зменшується, у випромінненні з'являються червоний, жовтогарячий, жовтий і, нарешті, білий кольори, що складаються 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.

Тому за принципом вимірювання пірометри можна поділити на такі види:

- а) яскравісні (оптичні), засновані на вимірюванні яскравості нагрітого тіла;
- б) кольорові (пірометри спектрального відношення), засновані на вимірюванні розподілу енергії в спектрі теплового випромінювання тіла;
- в) радіаційні, засновані на вимірюванні потужності випромінювання нагрітого тіла.

### **Оптичні пірометри.**

Оптичні пірометри широко застосовують у лабораторних і виробничих умовах для вимірювання температур вищих ніж 800 °С. Принцип дії оптичних пірометрів заснований на порівнянні спектральної яскравості тіла зі спектральною яскравістю градуйованого джерела випромінювання. Як чутливий елемент, що визначає збіжність спектральних яскравостей у візуальних оптичних пірометрах, використовують очі людини. Найпоширенішим є оптичний пірометр зі зникаючою ниткою, схема якого наведена на рисунку 12.6 а. Для вимірювання температури об'єктів приладу спрямовують на об'єкт вимірювання ОВ так, щоб спостерігач на його фоні побачив в окулярі 7 нитку оптичної лампи 4.

Порівняння спектральних яскравостей об'єкта вимірювання і нитки лампи 4 здійснюють зазвичай за довжини хвилі, що дорівнює 0,65 мкм, для цього перед окуляром установлений червоний світлофільтр 6. Вибір червоного світлофільтра обумовлений тим, що око людини сприймає через цей фільтр лише частину спектра його пропускання, що наближається до монохроматичного променю. Крім цього, 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. 12.6 г)) за допомогою реостата змінюють силу струму, що проходить від батареї Б до нитки лампи, доти, поки яскравість нитки не стане такою, що дорівнює видимій яскравості об'єкта вимірювання. Під час досягнення зазначеної рівності нитка «зникає» на фоні зображення об'єкта вимірювання (рис. 12.6 в). У цей момент за шкалою міліамперметра, попередньо градуйованим за значеннями температури яскравості нитки лампи, визна-

чають яскравісну температуру об'єкта. За обмірюваною яскравісною температурою і відповідними виразами розраховують істинну температуру об'єкта.

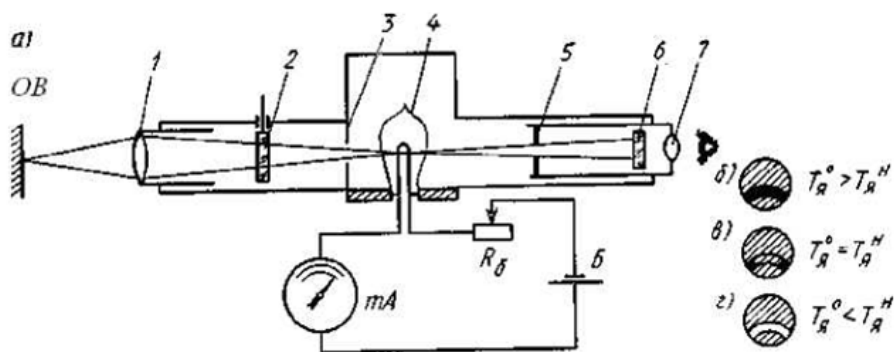


Рисунок 12.6 - Схема візуального оптичного пірометра

Оптичні пірометри призначені для вимірювання температур в інтервалі від 800 °С до 6 000 °С і мають різні модифікації з різними межами вимірювання. Клас точності оптичних пірометрів 1,5-4,0.

На результати вимірювання впливають наявність у навколишньому повітрі пилу, диму і великого вмісту двоокису вуглецю. Крім того, будь-яке забруднення оптичної системи пірометрів також приводить 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 виробы, графіт та інші є практично сірими. У цьому зв'язку переваги колірного методу вимірювання очевидні, тому що колірна температура багатьох твердих і рідких тіл значно менше відрізняється від істинної температури, ніж яскравісна або радіаційна.

Вимірювання можуть бути автоматизовані з використанням фотоприймального пристрою та системи автоматичного зрівноважування.

### Кольорові пірометри.

Чим вища температура й інтенсивніше тепловий рух носіїв заряду в тілі об'єкта, тим на більш високих частотах іде випромінювання. З цього виходить, що під час збільшення температури разом із ростом інтенсивності світла, яку зір сприймає за яскравість, змінюється співвідношення різних частотних складових.

Отже, колір нагрітого об'єкта залежить від його температури. Так, об'єкти, які мають температуру 700-800 °С світяться темно-помаранчевим світлом; за температури 1000 -1200 °С світло стає яскраво-помаранчевим,

поступово переходячи в жовте. За 2000 °С наше око сприймає колір за яскраво-жовтий, а після 2500 °С світіння наближається до білого кольору. Прилади, засновані на використанні цього явища, називають кольоровими пірометрами. Зазвичай вони визначають температуру щодо яскравостей для фіксованих довжин хвиль  $\lambda_i$  (кольорів) випромінювання. Це явище односторонньо залежить від температури.

Функціональна схема кольорового пірометра наведена на рисунку 12.7. Такі пірометри вимірюють температуру кольору об'єкта щодо інтенсивностей випромінювання на двох певних ділянках спектра. Основна перевага таких пірометрів полягає в незалежності їх показань від випромінювальної здатності об'єкта, а також від наявності диму, пилу і випарів у просторі між об'єктом і пірометром.

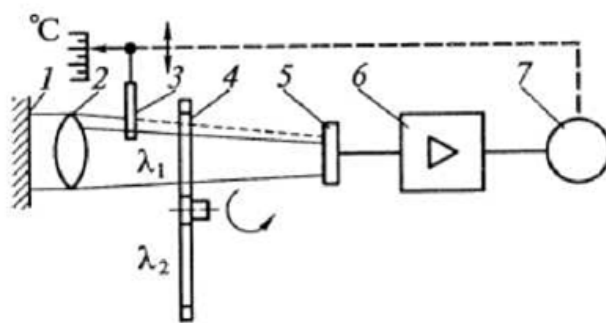


Рисунок 12.7 - Функціональна схема колірної пірометра:

1 - об'єкт вимірювання; 2 - об'єктив; 3 - фільтр; 4 - обтюратор; 5 - фотоелемент; 6 - підсилювач; 7 - реверсивний двигун

Світловий потік від об'єкта вимірювання 1 до фотоелемента 5 перетинає обтюратор 4 з двома світлофільтрами, що відповідають двом довжинам хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ . Це викликає появу на виході фотоприймача змінного сигналу, амплітуда якого пропорційна відношенню спектральних яскравостей вхідних потоків світла. Отже, амплітуда змінної складової вихідного сигналу залежить від температури поверхні об'єкта контролю. Змінну складову вихідного сигналу фотоприймача посилюють у підсилювачі 6 і подають на реверсивний двигун 7, який переміщує врівноважуваний фільтр 3 доти, поки не стануть однаковими інтенсивності випромінювання на обох довжинах хвиль. У положенні рівноваги змінна складова вихідного сигналу фотоприймача зникає, а переміщення фільтра 3 є мірою вимірювальної температури. Діапазон вимірювання кольорового пірометра становить від 1 000 °С до 2 500 °С. Під час використання інфрачервоних фотоприймачів нижня межа температурного діапазону може бути зменшена до 20 °С. Перевагою таких приладів є те, що для «сірих» тіл вимірюють дійсну температуру. Сірим називають тіло, ступінь чорноти поверхні якого можна взяти постійною в широкому діапазоні довжин хвиль випромінювання.

## Радіаційні пірометри (повного випромінювання).

Вимірювання температури пірометрами сумарного випромінювання засновано на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Прилади такого типу широко використовують для вимірювання низьких температур від 20 °С до 100 °С. Приймачі спільного випромінювання відрізняються тим, що їх спектральна чутливість постійна в широкому діапазоні довжин хвиль - від дальньої інфрачервоної області до ближньої ультрафіолетової. Теплові промені, які потрапляють на пірометр, концентрують за допомогою збірної лінзи на термочутливому елементі, що складається з невеликої термобатареї. За ступенем нагрівання останньої роблять висновок про температуру випромінювача. Для збільшення поглинальної здатності чутливі поверхні приймачів випромінювання фарбують у чорний колір. Для зменшення тепловідведення приймач розміщують у вакуумованому або газонаповненому корпусі. Як приймач застосовують термобатареї або болометри.

Термобатареї - це послідовно з'єднані термоелектричні перетворювачі (до 20 термопар). Їх гарячі спаї 1 (рис. 7.8) розміщують на вузькій ділянці затемненої поверхні 2, на яку фокусують випромінювання. Болометри - це термометри опору, виготовлені або з фольги провідних матеріалів, або з напівпровідників (термісторів). Теплові швидкодіючі індикатори виконують у вигляді тонкошарової термопари або болометра, в яких активний шар має добрий тепловий контакт з основою. Це дає можливість підвищити швидкодію.

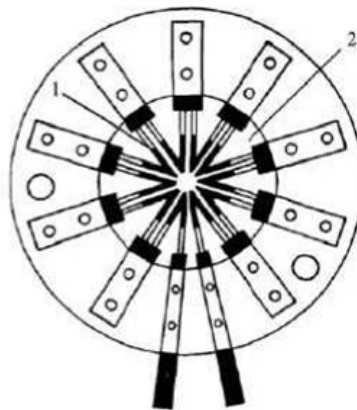


Рисунок 12.8 - Конструкція термобатареї

Як вторинний прилад пірометра можуть використовувати мілівольтметр або автоматичний потенціометр.

Пірометр сумарного випромінювання порівняно з візуальним пірометром характеризується низкою переваг: об'єктивністю методу вимірювання, відсутністю стороннього джерела живлення та можливістю застосування дистанційної передачі показань на вторинні прилади, але поступається йому в точності вимірювання.

Шкала пірометра, що градуєвана в градусах Цельсія радіаційної температури, має нерівномірні розподіли шкали сильно стиснені на початку та розтягнені наприкінці шкали.

Для вимірювання температур вищих ніж 3 000 °С 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 необмежена.

## 12.6 Тепловізори


**Тепловізор** - оптико-електронний прилад для візуалізації температурного поля та вимірювання температури, що працює в інфрачервоній частині електромагнітного спектра. Розподіл температури відображають на дисплеї як кольорову картинку, де різним температурам відповідають різні кольори. Вивчення теплових зображень називають термографією. Тепловізор може використовуватися як прилад для безконтактного вимірювання температури об'єктів і температурних полів.



Рисунок 12.9 – Вигляд сучасного тепловізору

Сучасний тепловізор має досить просту будову: об'єктив, тепловізійна матриця (чутливий елемент) і електронний блок оброблення сигналу. Саме спеціальна матриця, яка здатна вловлювати хвилі термального інфрачервоного спектра, є основою тепловізору. Матриця - це ґратка мініатюрних детекторів, що сприймає інфрачервоні сигнали і перетворює їх в електричні імпульси, які після підсилення перетворюють у відеосигнал. Розмір фотоелектричних матриць зазвичай становить 640x480 пікселів. Для фокусування та одержання чіткої картинки використовують спеціальну лінзу.

Тепловізори поділяють на дві категорії: з охолоджувальною і неоохолоджувальною матрицею.



Охолоджувані тепловізори - найчутливіші, дорогі та масивні, бо для охолодження використовують криогенні технології, що дозволяють охолоджувати матрицю до температур  $-170-210$  °С. Завдяки цьому можна одержати надзвичайно високу точність: такі тепловізори розрізняють об'єкти з різницею температур у  $0,1$  °С та забезпечують дальність зору в 300 метрів. Кращі охолоджувальні датчики здатні реагувати на одиничні фотони і мають час реакції менше ніж 1 мікросекунда. Недоліки камер з охолоджуваними матрицями - велике енергоспоживання і короткий термін служби криогенної системи, велика вартість, а також те, що охолодження матриці до робочої температури займає зазвичай кілька хвилин.

Неохолоджувані тепловізори на порядок дешевші та працюють за кімнатної температури, що дозволяє зробити їх компактними, тихими, з миттєвою активацією, але вони мають значно меншу чутливість. Переваги таких тепловізорів у тому, що вони починають працювати відразу після вмкнення, мають довгий термін служби і низьке споживання енергії. Простота і дешевизна неохолоджуваних тепловізорів зробили їх масовими.

### **Принцип дії тепловізорів.**


Принцип дії тепловізору заснований на перетворенні випромінення інфрачервоного спектра у видимий діапазон світлового випромінення. Кожне нагріте тіло випускає теплове випромінювання, інтенсивність і спектр якого залежать від властивостей тіла і його температури. Принцип дії тепловізору такий: інфрачервоне (теплове) випромінювання від досліджуваного об'єкта через оптичну систему передають на приймач, що являє собою матрицю термодетекторів. Одержані з фотоматриці сигнали потім перетворюють на електричні імпульси, за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації і математичного оброблення оцифровують і відображають на екрані комп'ютера або дисплеї тепловізору. Водночас синій колір зазвичай означає холодні ділянки, а червоний - гарячі.

Оскільки матриця під час своєї роботи також нагрівається та випромінює інфрачервоне світло, вона створює зайвий шум. Тому 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 випромінювання стає просто непомітною.

Головна проблема тепловізорів - об'єктиви. Оскільки звичайне оптичне скло непрозоре в інфрачервоному діапазоні, тобто поглинає хвилі інфрачервоного спектра, оптику тепловізорів роблять зі спеціальних матеріалів. Найчастіше це германій, але він дорогий, тому іноді використовують халькогенідне скло, селенід цинку або навіть поліетилен. Зараз вартість об'єктива становить приблизно 45 % вартості всього приладу, ще 45 % - матриця.

### **Сфери застосування тепловізорів**

Тепловізори застосовують для контролю стану об'єктів і технологічних процесів у різних галузях промисловості, а також під час проведення наукових досліджень.



Сфери застосування тепловізорів: енергетика і енергоаудит, машинобудування, будівництво, нафтова і хімічна промисловість, транспорт тощо. 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.

Розглянемо 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:

- визначення теплоізоляційних властивостей матеріалів;
- діагностика огорожувальних 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;
- тепла 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 тощо.

6. Тепловізори в медицині:

- моніторинг запальних процесів, локальних пухлин, порушення кровообігу, процесів загоєння ран, травм тощо.

## Висновки

Температура вимірюється за допомогою рідинних, манометричних, термоелектричних, електричних термометрів опору, пірометрів та тепловізорів. Кожен тип має свої переваги, недоліки та області застосування.

Традиційні засоби вимірювання: Рідинні термометри, особливо ртутні, забезпечують високу точність для місцевих вимірювань, проте мають обмеження через крихкість та інерційність. Дилатометричні термометри використовуються здебільшого як елементи сигналізації.

Сучасні технології: Термоелектричні термометри забезпечують широкий діапазон вимірювань ( $-50...+1800$  °C), високу чутливість і можливість дистанційного моніторингу. Електричні термометри опору (зокрема, платинові) є дуже точними і застосовуються у високотемпературних середовищах.

Безконтактні методи: Пірометри дозволяють вимірювати температуру тіл у діапазоні до  $+6000$  °C, не змінюючи їх теплове поле. Вони використовуються для швидкого та точного вимірювання високих температур. Тепловізори є універсальними приладами для моніторингу температурних полів, їх застосовують у будівництві, енергетиці, медицині, військовій техніці.


Похибки і корекція: Точність вимірювання залежить від вибору методу та засобу, а також умов експлуатації. Сучасні прилади забезпечують корекцію похибок за допомогою спеціальних алгоритмів та електронних схем.

Актуальність у практиці:

Вимірювання температури є критично важливим для промислових, наукових, медичних та енергетичних завдань. Застосування сучасних цифрових і безконтактних технологій значно розширило можливості контролю температурних параметрів.

## Контрольні запитання до теми 12

1. Що таке температура, і як вона визначається через тепловий контакт?
2. Які основні групи приладів використовуються для вимірювання температури, і на яких фізичних принципах вони базуються?
3. Як працюють ртутні та органічні рідинні термометри, і які їхні основні переваги та недоліки?
4. У чому особливості роботи дилатометричних термометрів (стрижневих і пластинчастих)?
5. Як конструктивно і функціонально влаштовані манометричні термометри?
6. Які робочі речовини використовуються в манометричних термометрах, і які їх діапазони температур?
7. Що таке термопара, і як вона використовується у термоелектричних термометрах?

- 
8. Які матеріали використовуються для виготовлення термоелектродів, і які їх переваги?
  9. Як працюють термометри опору, і які матеріали використовуються для їх виготовлення?
  10. У чому полягають особливості роботи термісторів, і які їхні переваги та недоліки?
  11. Що таке пірометр, і які види пірометрів існують?
  12. Як працюють оптичні пірометри, і для яких діапазонів температур вони призначені?
  13. Які основні принципи роботи кольорових пірометрів, і як вони визначають температуру об'єктів?
  14. У чому переваги і недоліки радіаційних пірометрів порівняно з іншими методами вимірювання температури?
  15. Що таке тепловізор, і як він функціонує для візуалізації температурного поля?
  16. Які типи матриць використовуються в тепловізорах, і які їхні основні характеристики?
  17. Як тепловізори використовуються в енергетиці, будівництві, медицині та інших галузях?
  18. У чому особливості охолоджуваних і неохолоджуваних тепловізорів, і які їхні сфери застосування?
  19. Як температурні методи допомагають виявляти дефекти в теплоізоляції, технічних конструкціях та обладнанні?
  20. Які обмеження і похибки виникають при вимірюванні температури різними приладами?

### **Використана література до теми 12**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
3. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: навчально-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабіченка. Харків: Мірошніченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.
4. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, метрологія та управління якістю: навчальний посібник / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.
5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.



6. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. [та ін.] Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Ун-т нові-тніх технологій; НАУ, 2017. 496 с.

7. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.

8. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 521 с.

9. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та за-соби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.

## ТЕМА 13 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗІВ ТА РІДИНИ

Об'ємні лічильники. Витратоміри змінного перепаду тиску. Ультразвукові витратоміри. Електромагнітні витратоміри. Вихрові витратоміри.

Витрата речовини - це кількість речовини, що проходить в одиницю часу по трубопроводу, каналу тощо. Кількість і витрату речовини виражають в об'ємних або масових одиницях вимірювання. Об'ємними одиницями кількості зазвичай є літр (л) і кубічний метр ( $\text{м}^3$ ), а масовими - кілограм (кг) і тонна (т). Найпоширенішими одиницями об'ємної витрати є л/год,  $\text{м}^3/\text{с}$  і  $\text{м}^3/\text{год}$ , а масової -  $\text{кг}/\text{с}$ ,  $\text{кг}/\text{год}$  і  $\text{т}/\text{год}$ .

Перехід від об'ємних одиниць витрати до масових і навпаки обчислюють за формулою

$$Q_M = Q_{об} \cdot \rho$$

де  $Q_M$  - масова витрата речовини,  $\text{кг}/\text{год}$ ;

$Q_{об}$  - об'ємна витрата речовини,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$\rho$  - густина речовини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Прилади, що вимірюють витрати, називають витратомірами. Залежно від виду вимірювальної речовини їх поділяють на витратоміри води, пари, газу тощо. Витратоміри бувають показувальними і самописними. Часто їх забезпечують вбудованим рахунковим механізмом (інтегратором).

До приладів, що вимірюють кількість, належать лічильники і ваги. За їх допомогою визначають кількість речовини, яка пройшла по тракту за відомий проміжок часу, для чого відраховують показання приладу на початку і в кінці періоду вимірювання і обчислюють різницю цих показань.

У виробництві найчастіше застосовують такі види витратомірів:

- витратоміри змінного перепаду тиску, що вимірюють витрати методом дроселювання потоку звужуючим пристроєм постійного перерізу, що встановлюють у трубопроводі;
- витратоміри змінного рівня, що вимірюють висоту рівня рідини, що тече через посудину;
- витратоміри постійного перепаду тиску, що вимірюють витрати за рахунок дроселювання потоку звужуючим пристроєм змінного перерізу;
- електромагнітні (індукційні) витратоміри;
- ультразвукові витратоміри.

### 13.1 Витратоміри змінного перепаду тиску

Найбільш поширеним і вивченим методом вимірювання витрат рідини, пару і газу є метод змінного перепаду тиску. Принцип дії витратомірів із звужуючим пристроєм заснований на зміні потенціальної енергії вимірювальної речовини під час проходження через штучно звужений перетин трубопроводу. Внаслідок місцевого стиснення потоку і відповідного збільшення швидкості потоку частину потенційної енергії перетворюють у кінетичну енергію. Зміна потенціальної енергії призводить до появи різниці статичних тисків (перепаду тиску), що визначають за допомогою дифманометра.

Витратомір складається із звужуючого пристрою, змонтованого в трубопроводі для створення місцевого стиску потоку (первинний перетворювач), диференціального манометра, призначеного для вимірювання різниці статичних тисків середовища, що має перебіг, до і після звужуючого пристрою (вторинний прилад), і сполучних ліній (двох трубок), що зв'язують між собою обидва прилади.

У вимірювальній техніці за звужуючі пристрої використовують нормальні діафрагми і сопла. Найбільш простим і поширеним звужуючим пристроєм є стандартна діафрагма.

На рисунку 13.1 наведені схема встановлення в трубопроводі діафрагми у вигляді тонкого диска із круглим отвором посередині та зображення характеру потоку. Там само показано розподіл статичного тиску  $P$  за довжиною потоку  $l$ .

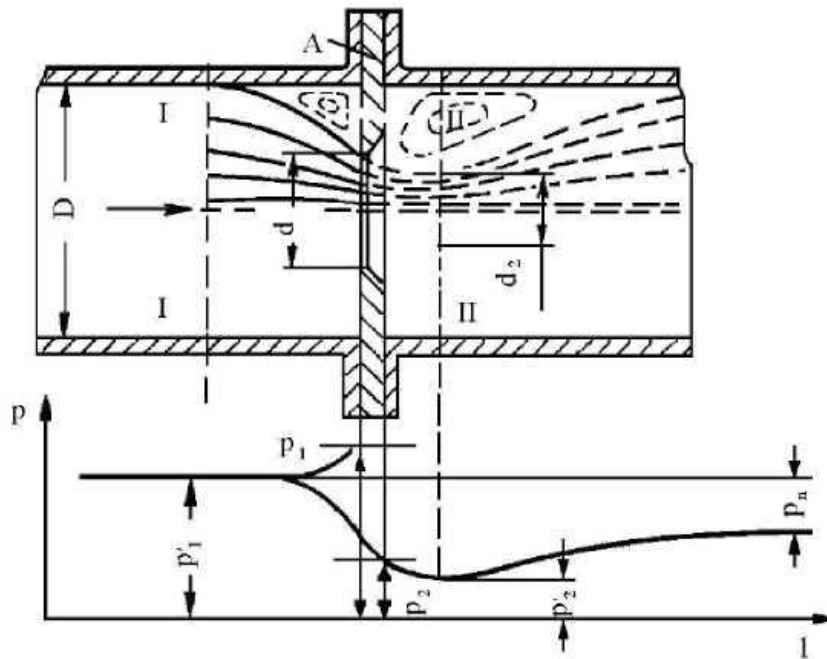



Рисунок 13.1 - Характер потоку під час встановлення діафрагми



Діафрагма (рис. 13.1) - це тонкий диск А, встановлений у трубопроводі так, щоб його отвір діаметром  $d$  був концентричний внутрішнім стінкам трубопроводу. Звуження потоку починають до діафрагми, потім на деякій відстані за нею завдяки дії сил інерції потік звужують до мінімального перетину  $d_2$ , а далі поступово розширюють до повного перерізу трубопроводу (внутрішній діаметр  $D$ ). Перед діафрагмою і за нею утворюються зони з вихровим рухом, причому зона вихорів за діафрагмою більша, ніж перед нею.

Тиск потоку біля стінки трубопроводу (суцільна лінія) трохи зростає завдяки підпору перед діафрагмою і знижується до мінімуму за діафрагмою в найбільш вузькому перерізі струменя I – II. Далі, через розширення потоку, тиск біля стінки знову підвищується, але не досягає попереднього значення. Залишкову втрату частини тиску  $P_{\Pi}$  пояснюють, головним чином, втратами енергії на завихрення, удар і тертя. Різниця тисків  $p_1 - p_2$  є перепадом, який залежить від витрат середовища, що проходить у трубопроводі.

Під час вимірювання витрат за методом змінного перепаду тиску речовина, що протікає, має цілком заповнювати всі перерізи трубопроводу і звужуючого пристрою; потік у трубопроводі повинен бути практично сталим, фазовий стан речовини не повинен змінюватися під час проходження через звужуючий пристрій (рідина не повинна випаровуватися, пар залишається перегрітим тощо).

Об'ємні витрати  $Q_{об}$  пов'язані з перепадом тиску  $\Delta P = p_1 - p_2$  таким співвідношенням:

$$Q_{об} = bS_0 \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\rho}}$$

де  $b$  – коефіцієнт витрат;

$S_0$  - переріз отвору діафрагми,  $m^2$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ ;

$\rho$  - - густина рідини,  $кг/м^3$ .

Діафрагму можна виготовляти з будь-яких матеріалів, під час вибору яких необхідно враховувати властивості вимірюваного середовища. Точність вимірювання витрати за допомогою діафрагм залежить від ступеня гостроти вхідної крайки отвору, що впливає на значення коефіцієнта витрати  $b$ . Роз'їдання гострої крайки діафрагми різко змінює коефіцієнт витрат  $b$ , вимірювання стають неточними. Тому для робочої частини діафрагми необхідно вибирати матеріал, стійкий до корозії, ерозії та механічного зносу, тобто нержавіюча сталь, а в деяких випадках - латунь або бронза.

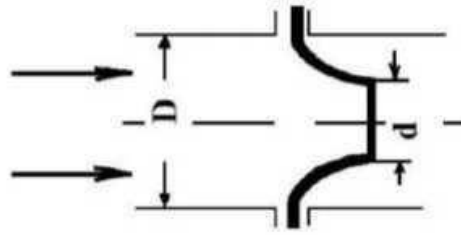


Рисунок 13.2 - Нормальне сопло

Сопло використовують у разі, коли необхідно зменшити вплив корозії та ерозії звужуючого пристрою на результати вимірювання. Нормальне сопло (рис. 13.2) являє собою коротку лійкоподібну насадку, встановлену концентрично в трубопровід. Сопло Вентурі (рис. 13.3) складається з профільної вхідної, циліндричної середньої і конічної вихідної частин. Профільну частину сопла Вентурі виконують так само, як у нормального сопла.

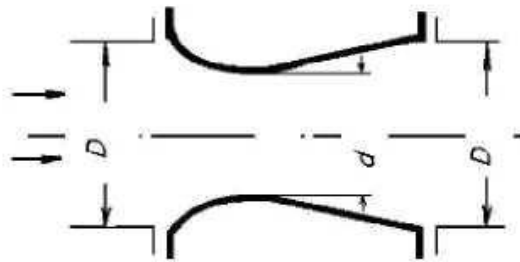



Рисунок 13.3 - Сопло Вентурі

Характер потоку і розподіл тиску однакові в усіх типах звужуючих пристроїв. Внаслідок того, що потік, який тече через сопло, майже не відривається від його профільованої частини, втрати на завихрення виникають в основному за соплом, тому залишкова втрата тиску в ньому менша порівняно з діафрагмою.

Ще менші втрати тиску в соплі Вентурі, профіль якого близький до перетину потоку, що тече через звуження. Це фізично пояснюють наявністю дифузора на виході, завдяки якому йде відновлення потенціальної енергії.

Нормальні сопла особливо зручні під час вимірювання витрат газів і перегрітої пари, а також під час вимірювання витрат пару високого тиску в трубопроводах діаметром  $D \leq 200$  мм. Порівняно з діафрагмами вони менш чутливі до корозії, забруднень і забезпечують трохи більшу точність вимірювання.

Сопла Вентурі можуть застосовуватися без індивідуального градування для діаметрів трубопроводів  $D \leq 50$  мм.



Для вимірювання перепаду тиску в звужуючому пристрої застосовують диференціальні манометри різної будови з безпосереднім показанням або записом витрат, або з передачею вимірюваної величини на вторинні показувальні, регульовальні, підсумовуючі та самописні прилади.

Зв'язок між дифманометром-витратоміром і звужуючим пристроєм здійснюють двома з'єднувальними трубками. Зазвичай застосовують мідні, алюмінієві, сталеві й пластмасові (з вініласту або поліетилену) трубки.

Істотне значення мають діаметр і довжина з'єднувальних трубок. За малих діаметрів трубки легко засмічуються, в них утворюються водяні пробки або повітряні бульбашки. Внаслідок підвищеного опору в трубках збільшується час запізнювання дифманометра. Занадто великі діаметри небажані через громіздкість проводки і збільшення витрат металу, а в разі вимірювання витрат газу також через шкідливий вплив об'єму на час запізнювання дифманометра. Рекомендують застосовувати трубки з внутрішнім діаметром 10-12 мм, але не меншим ніж 8 мм.

Довжина з'єднувальних трубок залежить від відстані між звужувальним пристроєм і дифманометром. Зі збільшенням довжини з'єднувальних трубок збільшується запізнювання в передачі імпульсів. Тому завжди потрібно застосовувати короткі з'єднувальні лінії, застосовуючи за потреби дифманометри з дистанційною передачею на вторинний прилад. Довжина з'єднувальних трубок не повинна перевищувати більше ніж 50 м.

До переваг цього методу належать такі: простота та надійність, відсутність рухомих частин, легкість серійного виготовлення засобів вимірювання практично на будь-які тиски та температури вимірювального середовища, низьку вартість, можливість вимірювання практично будь-яких витрат і можливість одержання градуальної характеристики витратомірів розрахунковим методом, тобто без використання дорогих метрологічних установок.

### **13.2 Витратоміри змінного рівня**

Принцип роботи витратомірів змінного рівня заснований на вимірюванні висоти рівня рідини в посудині під час вільного стікання її через отвір у бічній стінці посудини. Ці прилади застосовують у хімічній промисловості для вимірювання витрат особливо активних рідин. Їх можуть також застосовувати для вимірювання витрат пульсуючих потоків і рідин, змішаних із газом.

У всіх випадках вимірювання витрат рідини витратомірами змінного рівня відбувається під час атмосферного тиску, що значно обмежує їх застосування.

Витратомір змінного рівня має приймальну ємність (посудина) з отвором витікання тієї чи іншої форми і вимірювач рівня рідини. Для вимірювання рівня можуть застосовуватися будь-які стандартні прилади. Прийомними ємностями є зазвичай циліндричні або прямокутні посудини зі

щілинним отвором витікання. У таких судинах витрати визначають за висотою рівня рідини над нижньою кромкою отвору.

Витратомір, наведений на рисунку 13.4, являє собою прямокутний корпус 2 з двома штуцерами: бічним - для введення вимірюваної рідини та нижнім - для зливання рідини у відкритий приймач.

Усередині корпусу поділений глухою перегородкою, до якої герметично прикріплений щит з профільованою щілиною. У

посудині перед зливною щілиною занурена в захисному чохлі п'єзометрична трубка 1, через яку безперервно продувають повітря. Кількість поданого повітря контролюють за допомогою контрольного стаканчика 4, а тиск повітря підтримують постійним за допомогою редуктора 6. Для очищення повітря використовують фільтр 7.

Тиск у п'єзометричній трубці однозначно пов'язаний із густиною і висотою стовпця рідини перед щілиною, а отже, і з масовою витратою рідини. Величину гідростатичного напору в п'єзометричній трубці вимірюють дифманометром 3.

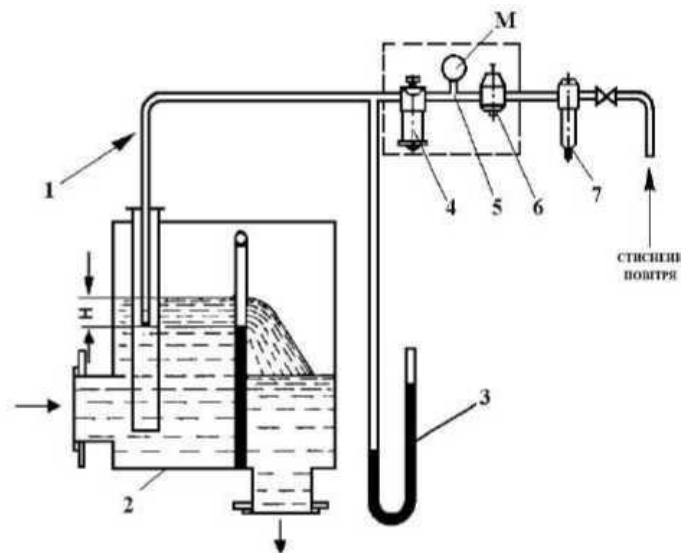


Рисунок 13.4 – Схема витратоміра з щілинним отвором 1 - п'єзометрична трубка; 2 - корпус; 3 - дифманометр; 4 - контрольний стаканчик; 5 - манометр; 6 - редуктор; 7 - фільтр

### 13.3 Витратоміри постійного перепаду тиску

Найбільш поширеними приладами групи витратомірів постійного перепаду тиску є ротаметри. Шкали ротаметрів практично рівномірні, ними можна вимірювати невеликі витрати, втрати тиску в них незначні і не залежать від величини витрат. Схема ротаметра наведена на рисунку 13.5. Потік рідини або газу, що проходить через ротаметр знизу, піднімає поплавков доти, поки розширююча кільцева щілина між тілом поплавка і стінками конусної трубки не досягне величини, за якої сила тяжіння, сила ти-

ску потоку на верхню площину поплавка, сила тиску потоку на нижню поверхню поплавка та сила тертя потоку об поплавок, що діють на поплавок, врівноважать один одного, і він встановлюється на тій чи іншій висоті залежно від величини витрат.

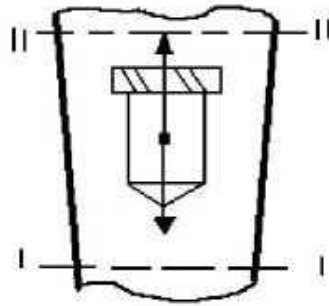


Рисунок 13.5 - Схема ротаметра

Ротаметри виконують зі скляної або металевої трубки. Шкала в ротаметрах зі скляної трубки витравлена на самій трубці, і відлік здійснюють по верхній горизонтальній площині поплавка.

У верхній частині поплавка часто роблять косі прорізи, завдяки чому поплавок обертається навколо вертикальної осі. Під час обертання поплавка центрується всередині трубки, не стикаючись зі стінками, за рахунок чого його чутливість підвищується.

Ротаметри зі скляною трубкою виготовляють для рідини або газу з тиском, що не перевищують  $6 \text{ кгс/см}^2$ . За більш високих тисків рідини або газу і для вимірювання витрати пари застосовують ротаметри з металевою трубкою. У таких ротаметрах використовують електричну або пневматичну дистанційні передачі.

На рисунку 13.6 наведена принципова схема ротаметра з електрично-диференціально-трансформаторною передачею показань на відстань. Вимірювальна частина ротаметра складається з циліндричного металевого корпусу 1 з діафрагмою 2, в отворі якої переміщується конусний поплавок 3, жорстко насаджений на шток 4. На верхньому кінці штока закріплений сердечник 5 диференціально-трансформаторного перетворювача. Сердечник рухається всередині роздільної трубки 6, зовні якої знаходиться котушка 7 перетворювача.

Ротаметри з металевою трубкою можуть бути безшкальними і показувальними. Безшкальні ротаметри працюють у комплекті зі вторинними диференціально-трансформаторними показувальними або реєструвальними приладами.

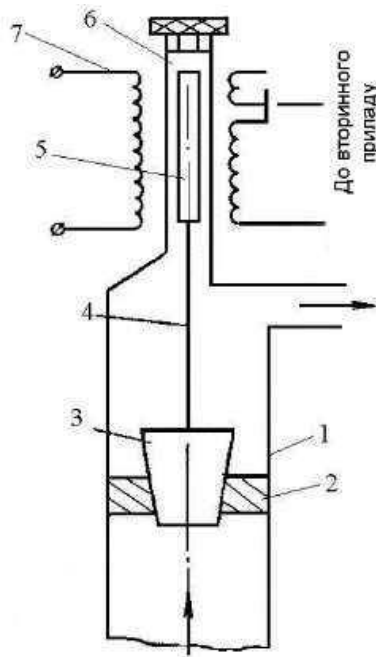


Рисунок 13.6 - Схема ротаметра з електричною дистанційною передачею: 1- корпус; 2- діафрагма; 3 - поплавок; 4 - шток; 5 - сердечник; 6 - роздільна трубка; 7 - котушка

Ротаметри з металевою трубкою розраховані на робочий тиск до  $64 \text{ кгс/см}^2$ . Межі вимірювання витрат (у розрахунку на воду) становлять від  $0,710^{-5}$  до  $0,44 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для вимірювання витрати у вибухонебезпечних і пожежонебезпечних умовах застосовують ротаметри з пневматичною дистанційною передачею.

### 13.4 Електромагнітні (індукційні) витратоміри

Розглянуті вище методи вимірювання витрати речовини характеризують тим, що чутливий елемент приладу перебуває безпосередньо у вимірювальному середовищі, тобто зазнає механічного і хімічного її впливу і спричиняє втрату тиску потоку. Безперервна дія вимірювального середовища на чутливий елемент із часом негативно впливає на точність, надійність і термін служби приладу. З іншого боку, самі чутливі елементи, перебуваючи в потоці, впливають на його аеродинамічні характеристики, що призводить до появи додаткової похибки вимірювання.

Для вимірювання витрати хімічно агресивних (кислоти, луги), абразивних (пульпи) та інших рідин, які пошкоджують матеріал частин витратоміра, що дотикаються, описані вище методи і прилади взагалі непридатні.

Існує ряд приладів для вимірювання витрати рідини, чутливий елемент яких не має безпосереднього з нею контакту, що дозволяє застосовувати їх для агресивних середовищ. До таких приладів належать електромагнітні (індукційні) витратоміри.

Електромагнітні витратоміри застосовують для вимірювання витрати електропровідних рідин. Їх використовують для вимірювання в трубопроводах об'ємних витрат водопровідної води, різних розчинів (солей, кислот), пульп, розплавлених металів та інших електропровідних рідин, електрична провідність яких повинна бути не меншою за електропровідність водопровідної води. Дія електромагнітних витратомірів ґрунтується на тому принципі, що під час проходженні в трубопроводі електропровідної рідини поперек силових ліній магнітного поля іони, що знаходяться в рідині, зміщуються і віддають свої заряди вимірювальним електродам, створюючи в них ЕРС  $E$ , пропорційну швидкості течії рідини. Величину цієї ЕРС визначають за формулою

$$E = B \cdot l \cdot v_{\text{сеп}} = \frac{4 \cdot B \cdot Q}{\pi \cdot d}$$

де  $B$  - магнітна індукція;

$l$  - відстань між кінцями електродів у трубі з внутрішнім діаметром  $d$  ( $l = d$ ), м;

$v_{\text{сеп}}$  - середня швидкість руху рідини, м/с;

$Q$  - витрата рідини, що тече, м<sup>3</sup>/с.

Отже, електромагнітний витратомір являє собою невеликий гідродинамічний генератор змінного струму, що виробляє ЕРС  $E$ , пропорційну середній швидкості потоку  $v_{\text{сеп}}$ , а отже, і витраті рідини  $Q$ .

Вимірювання витрати рідини електромагнітним методом здійснюють під час використання як постійного магніту, так і магніту зі змінним магнітним полем. Зазначені способи створення магнітного поля мають свої позитивні й негативні сторони.

Схема електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем наведена на рисунку 13.7 а.

Корпус 1 - це відрізок труби, виконаний з немагнітного матеріалу і покритий зсередини електричною ізоляцією (гумою, емаллю, фторопластом тощо), розміщений між полюсами магніту 2. Магнітні силові лінії спрямовані перпендикулярно до вектору швидкості руху рідини. Крізь стінку труби ізольовано від неї введені електроди 3, які перебувають у контакті з рідиною. Вся інформація надходить у вимірювальний пристрій 4.

Перевагою електромагнітних витратомірів із постійним магнітним полем є те, що значно зменшується проблема, пов'язана з перешкодами від зовнішніх змінних електромагнітних полів, особливо під час застосування

в промислових умовах, де працюють електромотори, магнітні крани, трансформатори та інше електротехнічне устаткування. До переваг таких витратомірів потрібно віднести відсутність необхідності в джерелі живлення чутливих елементів, тобто самих електродів, розміщених на трубопроводі, що забезпечує безпеку його роботи, та ряд інших факторів.

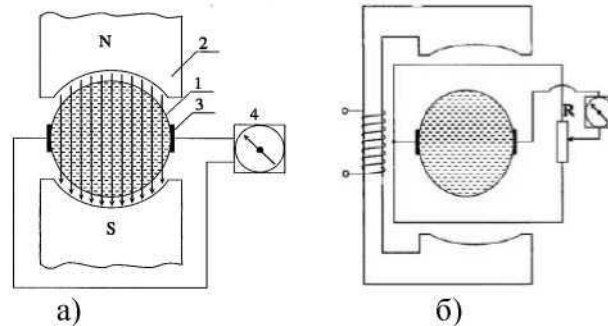



Рисунок 13.7 - Схема електромагнітного витратоміра:  
а) з постійним магнітним полем; б) зі змінним магнітним полем

Основним недоліком магнітних витратомірів із постійним магнітним полем є поляризація електродів, тобто виникнення у позитивного електрода негативних іонів, а у негативного електрода - позитивних іонів. Тому електромагнітні витратоміри з постійним магнітним полем не застосовують для рідин з іонною провідністю (кислоти, солі, водні розчини різних речовин тощо). Такі витратоміри набули застосування для вимірювання витрати рідких середовищ із електронною провідністю, до яких належать розплавлені рідкі метали (натрій, ртуть, залізобуглецеві розплави тощо) і в яких відсутнє явище поляризації. Можливе застосування таких витратомірів у атомних реакторах із розплавленим металевим теплоносієм, у плавильних і ливарних агрегатах на металургійних заводах тощо.

Для вимірювання витрати середовищ із іонною провідністю застосовують витратоміри зі змінним магнітним полем, створюваним електромагнітом (рис. 13.7 б). За досить високої частоти електромагнітного поля поляризація електродів практично відсутня.

Електромагнітні витратоміри різних модифікацій мають вбудований у вимірювальний блок мікропроцесорний пристрій, що обробляє інформацію від датчика витрати, встановленого на трубопроводі, реєструє значення миттєвої витрати і кількості за певний проміжок часу, має можливість передавання даних на ЕОМ інтерфейсом та інші операції.

Електромагнітні витратоміри, що мають клас точності 0,5-1,0, застосовують на трубопроводах практично будь-яких діаметрів без обмеження верхньої межі за витратою. Їх показання не залежать від в'язкості та густини середовища. Датчик витрати (чутливий елемент), практично безінерційний, перебуває поза рухомим середовищем і отже, не створює втрати тиску. Перевагами електромагнітних витратомірів є такі:



незалежність показань від в'язкості і густини вимірювального середовища;

- можливість застосування в трубах будь-якого діаметра;
- відсутність втрат тиску в потоці;
- необхідність меншої довжини прямих ділянок труб;
- висока швидкодія.

До основних недоліків електромагнітних витратомірів можна віднести такі:

- непридатні для вимірювання витрат газу і пари;
- непридатні для вимірювання витрати рідин-діелектриків (спирт, нафтопродукти тощо).

### 13.5 Ультразвукові витратоміри

Крім електромагнітних витратомірів як методи вимірювання витрат, в яких чутливі елементи перебувають поза рухомим середовищем, використовують ультразвукову хвилю, що надає інформацію про швидкість і витрату рухомого середовища у закритих і відкритих каналах. Такі методи дозволяють розширити кількість видів обмірюваних середовищ (розплавлені метали, кислоти, луги, агресивні й токсичні рідини, гази тощо).

В ультразвукових витратомірах використовують різні ефекти, пов'язані із поширенням ультразвуку через рухоме середовище: зміна швидкості ультразвуку в поздовжньому напрямку потоку; відхилення ультразвукової хвилі під час поперечного поширення в потоці; ефект Доплера тощо.

Найбільшого поширення набув метод вимірювання витрати, заснований на вимірюванні різниці часу проходження ультразвуку за напрямком і протилежно напрямку потоку середовища.

У таких приладах випромінювачі (п'єзоелементи) поширюють через рухоме середовище дві звукові хвилі в протилежних напрямках. Якщо середовище нерухоме, то обидві хвилі проходять ту саму відстань  $L$  до п'єзоелементів, що приймають ці хвилі, за однаковий час. Рухоме середовище прискорює одну звукову хвилю і сповільнює іншу. Різниця часу  $\Delta t$  її проходження відстані  $L$  цими хвилями пропорційна швидкості руху  $v$  середовища. Одним зі способів вимірювання  $\Delta t$  є вимірювання різниці фаз змінних напрямків, які виникають на приймальних п'єзоелементах.

На рисунку 13.8 наведена схема двоканального ультразвукового витратоміра, в якому використовують частотний спосіб вимірювання часових інтервалів під час поширення ультразвуку в двох напрямках: у напрямку потоку і протилежно до нього.

Ультразвукові хвилі, утворені двома випромінювачами 1 і 3, проходять перетин каналу в двох напрямках і надходять на два приймачі, які

перетворюють ультразвукові сигнали в електричні. За випромінювачі використовують п'єзокристали, які збуджують високочастотні електричні сигнали від генератора 2.

Приймачі 4 і 8 направляють електричні сигнали на відповідні реле 6, які керують роботою генератора 2 у режимі «увімкнено-вимкнено». Під час надходження сигналу на реле генератор вимикається, за відсутності сигналу - вмикається. Отже, генератор 2 працює в періодичному режимі, а час роботи і «мовчання» дорівнює часу поширення ультразвукових сигналів через рухоме середовище. Вимірювання часу роботи генератора (часу поширення ультразвуку через трубопровід) виконують у часовому блоці.

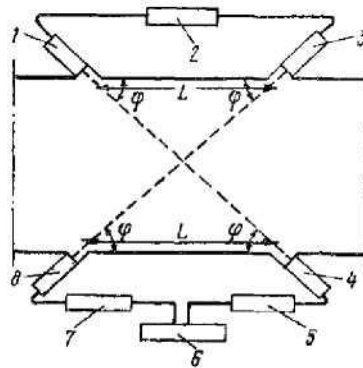


Рисунок 13.8 - Схема ультразвукового витратоміра:

1, 3 - п'єзоелементи, що випромінюють ультразвукові хвилі; 2 - генератор ультразвукових коливань; 4, 8 - п'єзоелементи, що приймають ультразвукові хвилі; 5, 7 - підсилювачі; 6 - фазометричний пристрій (реле)

Вираз для визначення витрати середовища ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) під час використання частотного ультразвукового витратоміра такий:

$$Q = \frac{F \cdot L}{2} \cdot (f_1 - f_2)$$

де  $F$  - перетин трубопроводу (каналу),  $\text{м}^2$ ;

$L$  - відстань між приймачами ультразвукового сигналу,  $\text{м}$ ;

$f_1, f_2$  - частота імпульсів під час прямого поширення ультразвуку і під час зустрічного поширення ультразвуку відповідно.

Як видно з формули показання частотного витратоміра не залежить від швидкості поширення ультразвуку в середовищі, що є важливою перевагою такого методу вимірювання витрати рідких і газоподібних середовищ.

В інших типах витратомірів ультразвукову хвилю спрямовують перпендикулярно до осі труби, і за величиною відхилення ультразвукової хвилі від перпендикуляра визначають витрату або середню швидкість по-

току. Зі збільшенням середньої швидкості потоку  $v$  напрямок ультразвукового сигналу зі швидкістю  $c$  усе більше відхиляється за напрямком швидкості потоку (рис. 13.9). Кут відхилення напрямку сигналу  $\alpha$  буде визначатися таким виразом:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{v}{c}\right).$$

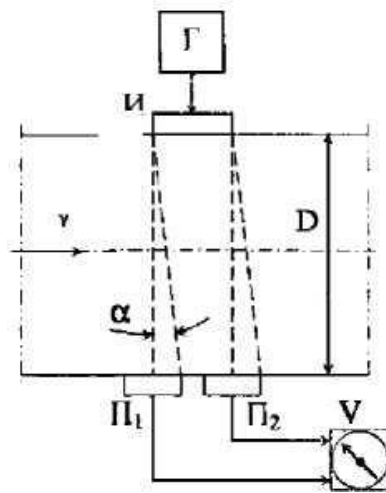


Рисунок 13.9 - Принцип дії ультразвукового витратоміра з вертикальним відхиленням ультразвуку

Зі збільшенням середньої швидкості середовища  $v$  кількість енергії, що надходить на приймач  $\Pi_1$ , зменшується, а та, що надходить на приймач  $\Pi_2$  - збільшується. Різниця сигналів від приймачів  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  збільшується зі зростанням середньої швидкості, а отже, і витрати надходять у витратомір  $V$ .

Витратоміри з такою схемою прості за будовою, але мають обмежену точність через мале відхилення хвилі. Крім того, швидкість ультразвуку, що входить у розрахункові формули витрати, може змінюватися під час зміни фізичних параметрів і складу вимірювального середовища, що вносить додаткову похибку.

Сучасні ультразвукові витратоміри комплектують вбудованими мікропроцесорами, які забезпечують оброблення інформації, що надходить від датчиків, вимірювання та індикацію витрати середовища (за годину, добу, місяць), формування уніфікованого струмового сигналу під час використання системи автоматичного регулювання, введення необхідних коригувальних і керуючих команд тощо.

Ультразвукові витратоміри є найбільш перспективними приладами для вимірювання витрат різних рідких і газоподібних середовищ. Найбільшу точність вимірювання мають одноканальні ультразвукові витратоміри з урізаними датчиками, похибка яких не перевищує 0,3 %.

## 13.6 Швидкісні лічильники рідини

Швидкісний метод визначення витрати й кількості рідини та газу покладений в основу ряду витратомірів і лічильників, що мають досить просту будову і значний діапазон показань. Принцип дії цих приладів полягає у вимірюванні середньої швидкості потоку  $v_{\text{сеп}}$ , пов'язаної з об'ємною витратою  $Q_{\text{об}}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) речовини залежністю

$$Q_{\text{об}} = v_{\text{сеп}} \cdot F$$

де  $v_{\text{сеп}}$  - середня швидкість потоку,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$F$  - поперечний переріз потоку,  $\text{м}^2$ .

За виконанням і призначенням швидкісні витратоміри та лічильники поділяють на швидкісні витратоміри та лічильники рідини, напірні трубки й анемометри.

### Швидкісні лічильники рідини.

Їх найчастіше застосовують для вимірювання об'єму води й тому називають лічильниками води. Чутливим елементом їх є лопатева вертушка, яку обертає потік рідини. Вісь вертушки за допомогою передавального механізму (редуктора), що зменшує частоту обертання, зв'язана з рахунковим пристроєм приладу. Отже, залежність витрати рідини  $Q_{\text{об}}$ , що протікає через швидкісний лічильник, визначають так:

$$Q_{\text{об}} = \frac{n \cdot F}{C},$$

де  $n$  - частота обертання вертушки,  $\text{об}/\text{хв}$ ;

$F$  - поперечний переріз потоку,  $\text{м}^2$ .

$C$  - сталий коефіцієнт.

З формули бачимо, що частота обертання вертушки пропорційна витраті рідини, завдяки чому будова приладу значно спрощується. Однак за дуже малих витрат спостерігають відхилення від цієї залежності внаслідок перетікання рідини через проміжки між вертушкою і корпусом приладу та тертя механізму в опорах. Формула виконується лише за відсутності завихрення рухомої рідини місцевими опорами (вигинами трубопроводу, вентилями тощо) поблизу лічильника.

Характерною величиною швидкісних лічильників рідини (як і інших лічильників) є так званий поріг початку показань, що виражає найменшу витрату речовини, нижче якого лічильник перестає давати безперервні показання.

Швидкісні лічильники виготовляють для вимірювання кількості холодної (до температури 30 °С) і гарячої (до 90 °С) води за робочого тиску до 1 МПа. Вертушку виконують із пластмаси або металу.

Істотним недоліком швидкісних лічильників є залежність показань від в'язкості вимірювальної рідини.

За формою вертушки швидкісні лічильники поділяють на крильчасті і турбінні. Вертушка перших має прями лопаті, спрямовані радіально до її осі, а других - вигнуті по гвинтовій лінії. Вісь вертушки в крильчастих лічильниках розміщена перпендикулярно до напрямку потоку, а в турбінних - паралельно йому.

Крильчасті лічильники призначені для встановлення в горизонтальних трубопроводах і застосовують під час вимірювання малих витрат води (до 10 м<sup>3</sup>/год). Турбінні лічильники можуть встановлювати в будь-якому положенні й використовують для вимірювання великих витрат води (до 150 м<sup>3</sup>/год).

На рисунку 13.10 наведена схема крильчастого лічильника води. У корпусі 1 із з'єднувальними штуцерами виконані два тангенціально спрямованих канали для входу й виходу води, що надходить на крильчатку 2. У верхній частині корпусу знаходиться стрілково-роликовий лічильний показчик 3, відділений від крильчатки і редуктора 4 перегородкою із сальником 5 вихідної осі.

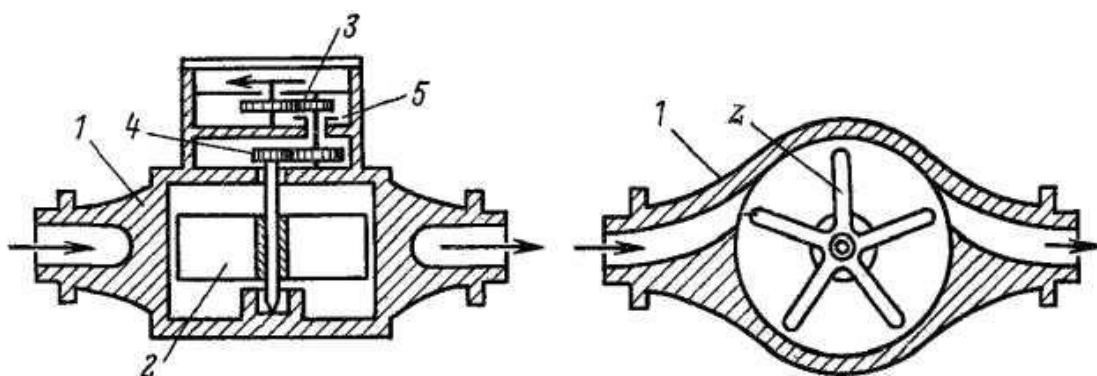


Рисунок 13.10 - Схема крильчастого лічильника води

Крильчасті лічильники мають лічильний пристрій із ціною поділки стрілкового показчика 0,001 і роликового - 0,1 м<sup>3</sup>. Кінцеве показання лічильного пристрою становить  $1 \cdot 10^4$  м<sup>3</sup> води. Лічильники встановлюють у трубопроводі відповідно до нанесеної на корпусі стрілки, що показує напрямок потоку рідини.

Турбінні лічильники води мають лопатеві вертушки у вигляді багатоголового гвинта з великим кроком. Частота обертання цієї вертушки пропорційна швидкості потоку рідини і обернено пропорційна кроку лопаті. У цьому випадку рівняння має вигляд:

$$Q_{об} = \frac{n \cdot F \cdot l}{K},$$

де  $l$  - крок лопаті вертушки, м;  
 $K$  - сталий коефіцієнт.

Схема швидкісного лічильника з аксіальною турбіною показана на рисунку 13.11. Усередині корпусу розміщена горизонтально уздовж напрямку вимірювального потоку рідини турбіна 6, виконана у вигляді багатогранного гвинта. Перед турбіною установлений пристрій випрямлення потоку 1, призначений для згладжування потоку на вході і виключення завихрення. Обертання турбіни через черв'ячну пару 5 і передавальний механізм 2, розміщений у камері 4, передають через сальник лічильному пристрою 3. Для регулювання швидкості обертання турбіни у процесі тарування лічильника передбачено регульовальний пристрій 7, що дозволяє повертати одну з радіальних перегородок пристрою випрямлення щодо напрямку потоку.

Турбінні лічильники використовують для вимірювання великих обсягів води і розраховані на номінальні витрати від 20 до 1250 м<sup>3</sup>/год.

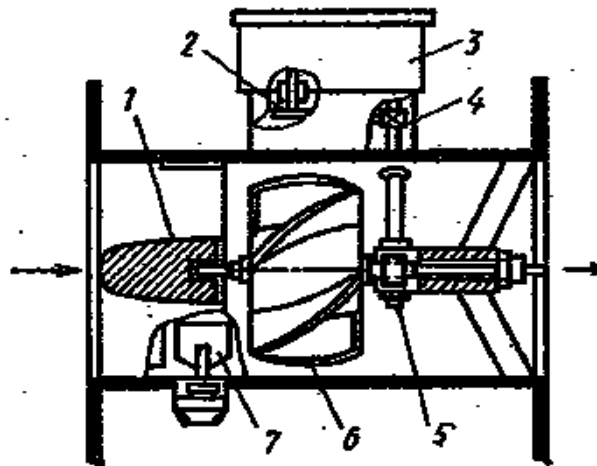


Рисунок 13.11 – Схема швидкісного лічильника з аксіальною турбіною

### Анемометри.

Для визначення швидкості потоку газу (повітря), особливо за малих її значень, коли через невеликий динамічний тиск вимірювання напірними трубками не забезпечує необхідної точності, набули застосування порівняно прості і чутливі прилади - анемометри, які придатні для вимірювання газових потоків, що перебувають під невеликим надлишковим тиском.

За допомогою анемометрів знаходять швидкість газу в точці розміщення приладу, а за значенням середньої швидкості потоку можна зро-

бити висновок про витрату вимірювального середовища. Анемометри застосовують для визначення продуктивності повітродувних і повітровідвідних пристроїв, зокрема вентиляційних, а також набули поширення під час метеорологічних вимірювань. Класифікують анемометри за двома типами: механічні та електронні.

Механічний анемометр. Чутливим елементом анемометра є алюмінієва вертушка з декількома радіально розміщеними лопатями, вісь якої зв'язана механічно із лічильним пристроєм. У газовому потоці вертушка починає обертатися зі швидкістю, пропорційною швидкості потоку, завдяки тиску цього газу на її лопаті.

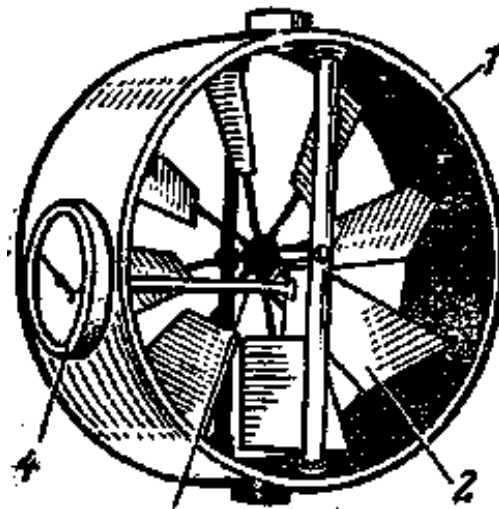


Рисунок 13.12 - Крильчастий анемометр

Найчастіше застосовують крильчастий анемометр, придатний для вимірювання швидкості потоку в межах 0,1-10 м/с.

Прилад (рис. 13.12) являє собою металеве кільце 1, усередині якого на горизонтальній осі закріплена крильчатка 2 з лопатями, що розміщені на спицях під кутом  $45^\circ$  до площини, перпендикулярної до осі крильчатки. Під час вимірювання анемометр розміщують так, щоб вісь крильчатки була паралельна напрямку потоку, що проходить через кільце. За допомогою черв'ячної пари та осі 3 обертання крильчатки передають лічильному пристрою 4, закріпленому на зовнішній бічній стороні кільця.

Анемометри непридатні для вимірювання швидкості різко пульсуючого потоку.

У показувальних анемометрах на осі вертушки закріплюють ротор мініатюрного генератора змінного струму. Залежно від частоти цього обертання генератор змінює вироблювану напругу, що вимірюють мілівольтметром, градуйованим у м/с.

### 13.7 Прилади для вимірювання об'єму речовини

Принцип дії приладів для вимірювання об'єму речовини ґрунтується на вимірюванні певного об'єму речовини, який проходить через прилад, і складанні результатів цього вимірювання. До таких пристроїв належать мірні баки та об'ємні лічильники.

#### Мірний бак.

Мірний бак є найпростішим і точним вимірювальним пристроєм, що застосовують для визначення кількості рідини під час повірки витратомірів і лічильників, а також під час випробувань відповідних установок.

Схема мірних баків показана на рисунку 13.13.

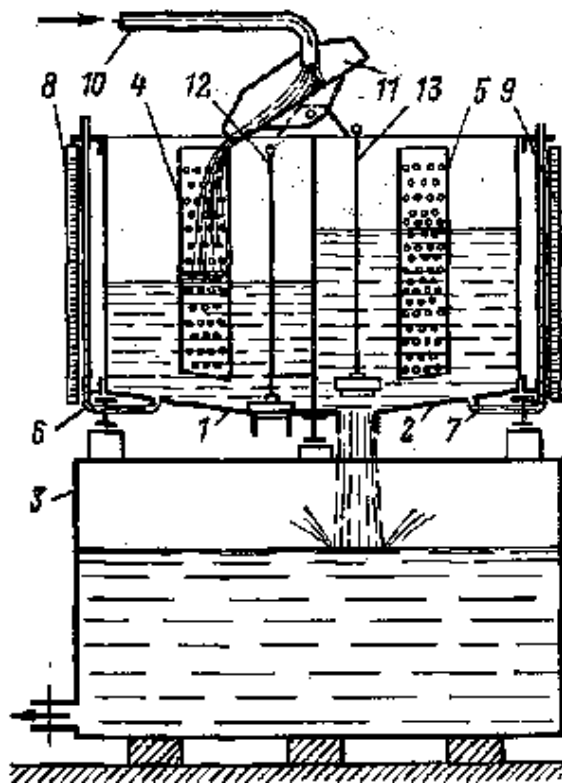


Рисунок 13.13 - Мірний бак

Пристрій складається зі спарених мірних прямокутних баків 1 і 2 постійного за висотою перетину і збирного бака 3. Усередині мірних баків знаходяться заспокоювачі 4 і 5 у вигляді патрубків із великою кількістю отворів у стінках. Обидва мірних баки забезпечені вказівними скляними трубками 6 і 7, поруч із якими встановлені циферблати 8 і 9 з міліметровими шкалами. Вимірювану рідину, що надходить по трубопроводу 10, направляють по черзі в кожен із мірних баків за допомогою перекидного пристрою 11. Для зливу рідини з мірних баків 1 та 2 у збирний бак 3 використовують зливальні патрубки із запірними клапанами 12 і 13. Кожен мірний бак попередньо градуують, тобто визначають залежність між висотою рівня рідини у вказівному склі і внутрішньому об'ємі бака.

### Об'ємні лічильники.

Вони мають мірні камери зі стінками, що переміщуються і витискують вимірювальний об'єм рідини, звільняючи камеру для наступної порції. До об'ємних лічильників зазначеного типу належать: однопоршневі, багатопоршневі, кільцеві, з овальними шестернями, ротаційні, сухі газові, мокрі газові та дискові.

Лічильники з овальними шестернями (рис. 13.14) застосовують для вимірювання кількості рідини в широкому діапазоні в'язкості (до  $300 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

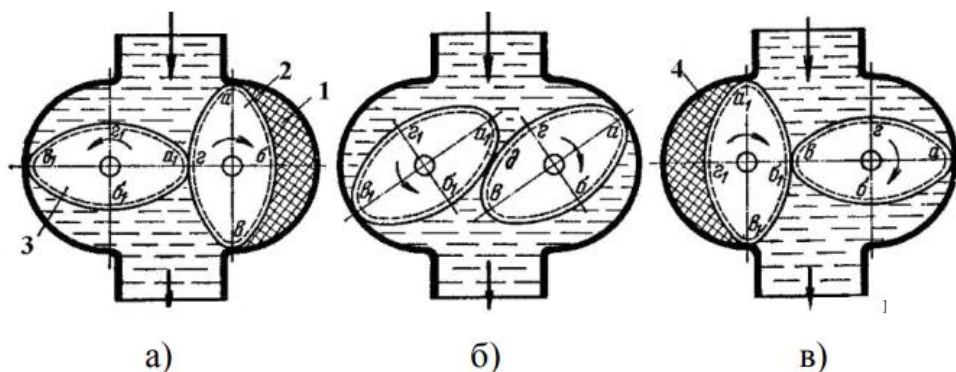


Рисунок 13.14 - Схема об'ємного рідинного лічильника з овальними шестернями

Дія їх ґрунтується на витисненні певних обсягів рідини, які утворюються між вимірювальної камери 1 і овальними шестернями 2 і 3, під час обертання останніх під впливом руху вимірювальної рідини.

Овальні шестерні, що перебувають між собою в безперервному зчепленні, під час обертання обкатують одна одну. Залежно від положення шестерень кожна з них по черзі є ведучою і веденою.

У першому вихідному положенні (рис. 13.14 а) поверхня  $a_2\Gamma_2$  шестірні 2 розміщена під тиском рідини, що надходить, а рівна їй поверхня  $в\Gamma$  - під меншим за вхідний тиском рідини, що виходить. Ця різниця тисків створює обертальний момент, що обертає шестірню 2 за годинниковою стрілкою, причому рідина з порожнини 1 і порожнини, розміщена під шестірнею 3, витісняється у вихідний патрубок. Обертальний момент шестірні 3 дорівнює нулю, оскільки поверхні  $a_3\Gamma_3$  і  $\Gamma_3B_3$  однакові й містяться під однаковим вхідним тиском, а однакові поверхні  $a_3B_3$  і  $B_3B_3$  - під однаковим вихідним тиском. Отже, шестірня 2 є ведучою, а шестірня 3 - веденою.

У проміжному положенні (рис. 13.14 б) шестірня 2 обертається в попередньому напрямі, але її обертальний момент буде меншим, ніж у положенні а, через протидію моменту, створеного тиском на поверхню  $d\Gamma$  (д - точка контакту шестерень). Поверхня даві шестірні 3 розміщена під тис-

ком рідини, що входить, а поверхня в1б1д - під тиском рідини, що виходить. Шестірня відчуває крутний момент, спрямований проти годинникової стрілки. У цьому положенні обидві шестерні - ведучі.

У другому вихідному положенні (рис. 13.15 в) шестірня 3 перебуває під дією найбільшого обертового моменту і є тією, що веде, в той час як обертовий момент шестірні 2 дорівнює нулю, вона є веденою.

Однак сумарний обертальний момент обох шестерень для будь-якого положення залишається незмінним.

За час повного обертання шестерень (один цикл роботи лічильника) порожнини 1 і 4 два рази заповнюються і два рази випорожняються. Обсяг чотирьох доз рідини, витісненої з цих порожнин, становить вимірювальний об'єм лічильника. Вісь однієї із шестерень обертає рахунковий механізм, розміщений поза корпусом приладу.

Лічильники з овальними шестернями можна застосовувати для вимірювання кількості майже всіх рідин, зокрема й в'язких, номінальні витрати становлять від 1,7 до 60 м3/год.

Ротаційні лічильники газу в основному застосовують для вимірювання кількості горючих газів, принцип дії яких той самий, що і лічильників рідини з овальними шестернями. Ротаційний лічильник (рис. 13.15) містить вимірювальну камеру 1, в якій розміщені широкі обертові лопаті 2 і 3 у формі вісімки, які рухаються завдяки різниці тисків газу, що проходить через лічильник.

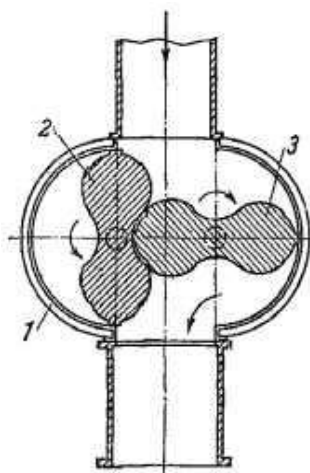



Рисунок 13.15 - Схема ротаційного лічильника

Прилад має лічильний пристрій із роликівим показчиком, з'єднаний з однією з лопатей за допомогою магнітної муфти або за допомогою вихідної осі, пропущеної крізь сальник. Прилади розраховані на робочий тиск газу 0,1 МПа і температуру 0–50 °С. Основна похибка лічильників становить  $\pm (1-1,5) \%$ .

Крім розглянутих лічильників для вимірювання кількості рідини широко застосовують об'ємні лічильники з циліндричним поршнем, принцип



дії яких заснований на витісненні з вимірювальної камери (циліндра) визначених обсягів рідини циліндричним поршнем, який переміщується за рахунок різниці тисків вимірюваної рідини до лічильника та після нього.

Для вимірювання кількості рідин застосовують як швидкісні, так і об'ємні лічильники, а для вимірювання кількості газу - лише об'ємні лічильники.

### **13.8 Ваговий метод вимірювання витрати сипучих речовин**

Найбільш точним способом вимірювання кількості твердих і сипучих тіл є зважування.

Ваговий метод вимірювання масової витрати сипучої речовини полягає в періодичному або безперервному вимірюванні сили ваги, створеної вагою окремих порцій або ділянок потоку сипучої речовини.

Витратоміри, що реалізують цей принцип вимірювання, є автоматичними вагами. Останні поділяють на дві великі групи: ковшові й конвеєрні. Перші є витратомірами періодичної дії. Вони вимірюють вагу послідовних порцій маси сипучої речовини. Другі - безперервної дії. Вони вимірюють вагу маси сипучої речовини, що перебуває на тій ділянці рухомого конвеєра, яка проходить у цей момент над пристроєм для вимірювання ваги.

#### **Автоматичні порційні ваги.**

Порціонні ваги автоматично відсікають певні порції матеріалу, що надходить із живильного бункера, а після зважування викидають зважену порцію в приймальний бункер. Лічильник ваг підсумовує масу матеріалу, що пройшла через ваги.

Автоматичні порційні ваги для твердих сипучих матеріалів зазвичай виконують із перекидним ковшем або із дном ковшу, що відчиняється. Основними перевагами цих ваг є порівняльна простота конструкції, висока точність зважування, робота ваг без спеціального привода.

Ваги для безперервного зважування характерні тим, що конструктивно вони нерозривно пов'язані з системою транспортування матеріалу (конвеєрні ваги, автоматичні вагові дозатори і тощо).

На рисунку 13.16 показана принципова схема автоматичних ваг із перекидним ковшем.

До одного кінця рівноплечого подвійного коромисла 1 на підвісці 3 прикріплений ківш 4, а до іншого - гиретримач 5 з гирями. За порожнього ковша центр тяжіння завдяки противазі 6 на задній стінці ковша знаходиться з правого боку точки підвісу; ківш намагається повернутися навколо точки підвісу за годинниковою стрілкою, чому перешкоджає упор 7. Під час заповнення ковша зважувальним продуктом ліва сторона, що має більший об'єм, стає важчою ніж права. Внаслідок цього порожній ківш завжди повертається за годинниковою стрілкою, а заповнений - проти годинникової стрілки. У наповненого ковша центр тяжіння зміщується вліво від точки підвісу. Від передчасного перекидання проти годинникової стрілки

ківш утримує клямка 9, накинута на призму 8, забиту ззовні в бічну стінку ковша. Клямка 9 шарнірно укріплена на підвісці 3.

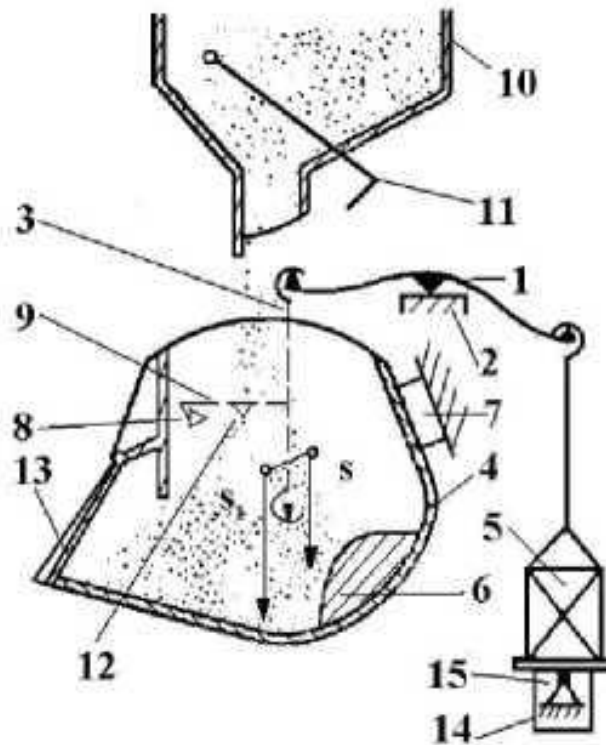


Рисунок 13.16 - Схема ваг із перекидним ковшем:

1 - коромисло; 2 - станина; 3 - підвіска; 4 - ківш; 5 - гиретримач; 6 - проти-вага; 7 - упор; 8 - призма; 9 - клямка; 10 - живильна воронка; 11 - заслі-нка; 12 - нерухомий упор; 13 - дверцята; 14 - скоба; 15 - нерухомий упор

Ківш наповнюють через живильну воронку 10, вихідний отвір якої за-криває заслінка 11. Під час заповнення продуктом ківш повільно опу-скається вниз, а гиретримач 5 піднімається вгору. Після досягнення рівноваги гиретримач впливає на механізм управління заслінкою 11, внаслідок цього остання падає і закриває нижній отвір воронки 10.

Після припинення надходження зважувального матеріалу наповне-ний ківш по інерції продовжує рух вниз доти, поки скоба 14 гиретримача 5 не зустрінє упору 15. Під час опускання ковша клямка 9 зстикається з не-рухомих упором 12, закладеним у станину ваг, і, піднімаючись, звільняє призму 8. Звільнений від запору ківш повертається проти годинникової стрілки; дверцята 13 під дією власної ваги і тиску матеріалу, що розміщені в ковші, відкриваються, і вміст ковша висипається.

Як тільки ківш повністю спустошиться, внаслідок переміщення цен-тру ваги вправо, він повернеться за годинниковою стрілкою, відкривши при цьому заслінку 11. Одночасно з цим призма 8, піднімаючись разом із ковшем, потрапляє під зуб клямки 9.

Далі процес повторюється знову. Кількість перекидань ковша врахо-вують лічильником на станині ваг. Циферблат лічильника безпосередньо

вказує вагу продукту, що пройшов через ваги з початку їх роботи. Кількість перекидань ковша в автоматичних вагах зазвичай невелика - від 2 перекидань до 3 перекидань за 1 хвилину. Ємність ковша коливається в досить широких межах від 5 кг до 20 т залежно від продуктивності ваг. Основна допустима похибка становить від  $\pm 0,5\%$  до  $\pm 1\%$ .

Ударні навантаження працюючих ваг з перекидним ковшем змушують вдаватися до масивних фундаментів.

На рисунку 13.17 показана принципова схема автоматичних ковшових ваг з дном, що відкривається. Ці ваги також побудовані за принципом рівноплечих ваг.

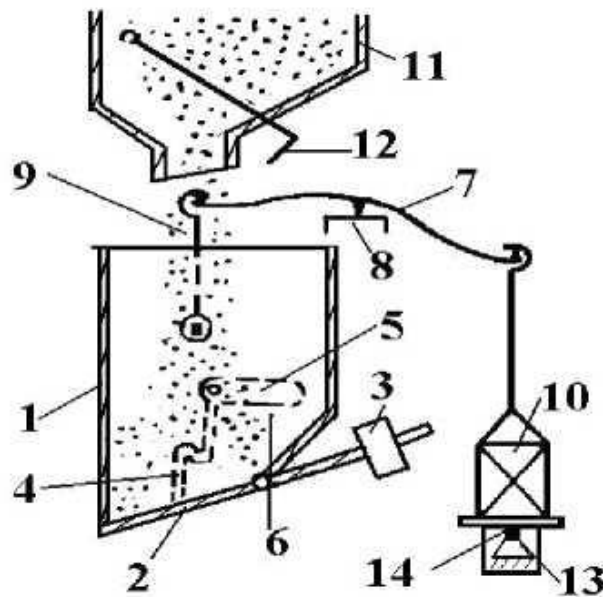


Рисунок 13.17 - Автоматичні порційні ваги із дном, що відкривається:

1 - ківш; 2 - відкидне дно; 3 - противага; 4 - гачок; 5 - клямка; 6 - нерухомий упор; 7 - коромисло; 8 - станина; 9 - підвіска; 10 - гиретримач; 11 - живильна воронка; 12 - заслінка; 13 - скоба; 14 - нерухомий упор

Ваги із дном, що відкривається, відрізняють від ваг з перекидним ковшем ( рис. 13.17) будовою ковша 1, який має відкидне дно 2 з противагою 3, яка закриває дно під час спорожнення ковша. Над ковшем нерухомо закріплена воронка 11, нижній отвір якої закриває заслінка 12. Ліворуч на дні 2 ковша знаходиться гачок 4, який своїм виступом, заходить за виступ клямки 5 й утримує дно під час заповнення ковша.

Під час наповнення ковша продуктом заслінка 12 відкрита і утримується в цьому положенні. Продукт з воронки 11 надходить у ківш 1 ваг і змушує останні поступово опускатися. Коли ківш 1 прийде в рівновагу з гиретримачем 10, заслінка 12 падає і припиняє наповнення ковша. За інерцією ківш продовжує опускатися; водночас клямка 5 зстикається з неру-

хомим упором 6, що знаходиться на станині ваг, і обертається проти годинникової стрілки, звільняючи гачок, а разом з ним і дно ковша. Після цього дно ковша відкривається і продукт висипається з ковша. Коли весь продукт висипався з ковша, противага 3 закриває дно ковша і гачок 4 знову входить у зчеплення з клямкою 5.

Водночас порожній ківш піднімається і відкриває заслінку 12. Починається нове наповнення ковша.

Ваги із дном ковша, що відкривається, працюють значно спокійніше (в частині ударних навантажень) за ваги з перекидним ковшем.

### Автоматичні конвеєрні ваги.

Такі ваги реєструють сумарну масу сипучого матеріалу, перенесеного транспортером, і показують миттєву продуктивність. Принципова схема автоматичних конвеєрних ваг показана на рисунку 13.18.

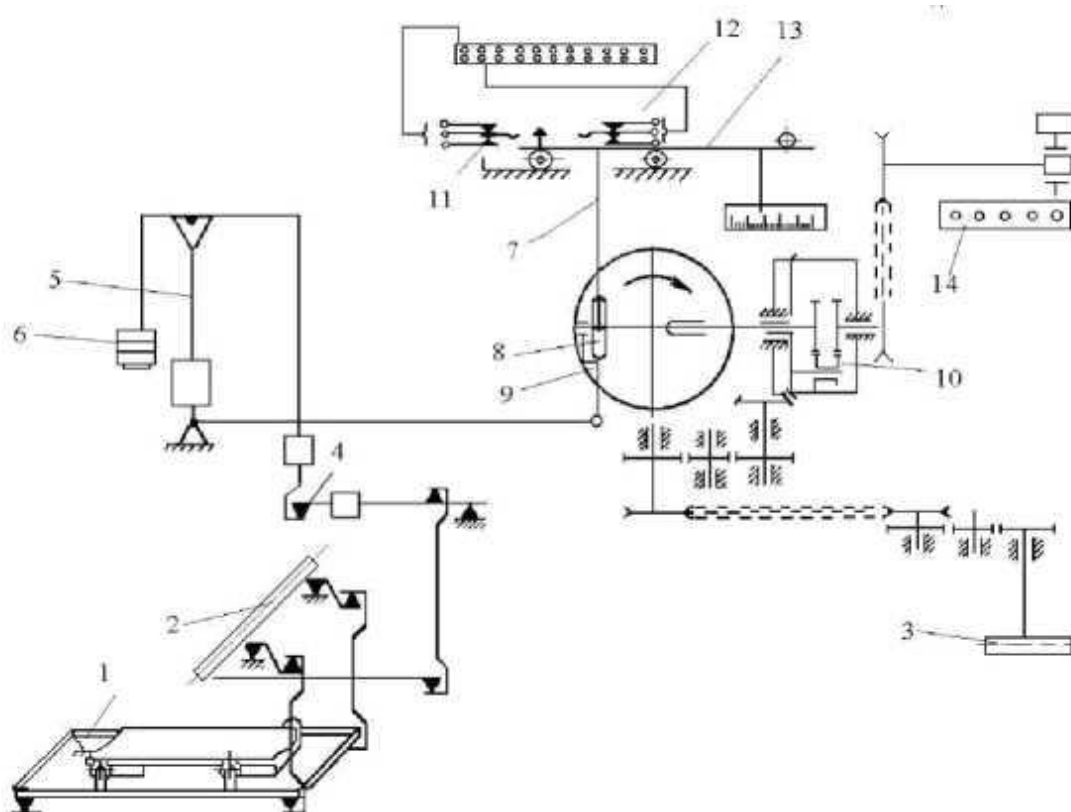



Рисунок 13.18 - Принципова схема автоматичних конвеєрних ваг:  
 1 - вантажно-приймальна платформа; 2 - важіль; 3 - приводний ролик; 4 - важіль; 5 - квадрант; 6 - вантажі; 7 - поводок; 8 - ролик каретки інтегратора; 9 - диск інтегратора; 10 - зубчастий диференціал; 11 - кінцевий перемикач; 12 - подорожній перемикач; 13 - каретка; 14 - лічильник

Ваги вбудовують у стаціонарний стрічковий транспортер. Платформа ваг несе на собі дві вагові роликові опори і є ділянкою транспортера.

Ваги працюють таким чином. Матеріал, що розміщений на стрічці конвеєра, впливає на дві вагові роликові опори, закріплені на вантажно-



приймальній платформі 1. Через важелі 2 і 4 це зусилля передають на вантажопідйомне плече квадранта 5, який за допомогою повідка 7 шарнірно з'єднаний з роликом 8 каретки інтегратора. Ролик утворює фрикційну пару з диском 9. Диск інтегратора обертає приводний ролик 3 через відповідну передачу. Приводний ролик притискується до холостої гілки стрічки конвеєра, яка і надає йому обертання. Отже, кутова швидкість диска 9 інтегратора завжди відповідає лінійній швидкості стрічки конвеєра. Кожне відхилення квадранта внаслідок збільшення навантаження на платформу 1 викликає поворот ролика 8 у площині креслення, що призводить до появи деякого кута між коловими швидкостями диска 9 і ролика 8. Водночас з'являється сила, яка намагається перемістити ролик 8 далі від центру диска 9. Це переміщення можливе лише разом з кареткою 13, що котиться по нерухомій рейці. Переміщення відбуватиметься до суміщення напрямків кутових швидкостей ролика і диска в новому положенні, тобто на іншій відстані від центру диска.

Відхилення квадранта 5 під час зменшення корисного навантаження викличе зворотний процес. Отже, кожному положенню квадранта 5, який визначає величину погонного навантаження на стрічці, відповідає певна відстань фрикційної точки ролика 8 від центру диска 9; тоді кутова швидкість ролика пропорційна шуканій масі матеріалу. Кутові швидкості диска 9 і ролика 8 підсумовують зубчастим диференціалом 10. Результуюча швидкість веденого валу диференціала обумовлює обертання першого диска лічильника 14, що показує масу перенесеного транспортером матеріалу. Тарування ваг проводять виміром маси накладних вантажів 6.

Ваги забезпечені показником продуктивності конвеєра, що показує положення каретки 13 щодо нерухомої рейки, а отже, і величину продуктивності в кожен момент часу за незмінної швидкості конвеєра. Крім того, ваги забезпечують електричним сигнальним пристроєм, що фіксує перевантаження і недовантаження стрічки конвеєра під час його роботи.

Сигнальний пристрій складається з кінцевого 11 і подорожнього 12 перемикачів, що спрацьовують під час пересування каретки 13 по нерухомій рейці. Кінцевий перемикач вмикає сигнальний пристрій під час досягнення найбільшого допустимого погонного навантаження на стрічці конвеєра. Подорожній перемикач вмикає сигнальний пристрій під час роботи ваг з погонними навантаженнями нижче допустимих.

Перевантаження стрічки (межі вище максимального погонного навантаження) лічильник не враховує. Ваги можуть виготовляти з вторинними приладами, що забезпечують дистанційну передачу показань ваг.

В автоматичних конвеєрних вагах неперервного зважування відбувається підсумовування матеріалу, що був перенесений транспортною стрічкою ваг.

Допустима похибка ваг становить  $\pm 1\%$ . Швидкість стрічки транспортера досягає 2,5 м/с; ширина стрічки транспортера розміщується в межах від 400 мм до 2 000 мм; погонні навантаження на стрічку транспортера становлять 6-500 кг/м.

## Висновки

Для вимірювання витрат газів і рідин використовуються різні прилади, такі як об'ємні лічильники, витратоміри змінного перепаду тиску, ультразвукові, електромагнітні та вихрові витратоміри. Кожен із методів має свою специфіку, що дозволяє адаптувати вимірювання до характеристик середовища.

Принципи вимірювання: Витратоміри змінного перепаду тиску базуються на перетворенні потенційної енергії в кінетичну через звуження потоку. Електромагнітні витратоміри вимірюють витрати електропровідних рідин за допомогою створення ЕРС у магнітному полі. Ультразвукові витратоміри використовують час проходження звукових хвиль у середовищі для визначення швидкості потоку.

Переваги сучасних витратомірів: Електромагнітні та ультразвукові витратоміри забезпечують високу точність вимірювань, відсутність втрат тиску і можливість роботи з агресивними середовищами. Ультразвукові прилади є перспективними через можливість роботи з різними типами рідин і газів.

Обмеження та похибки: Деякі витратоміри, такі як електромагнітні, непридатні для діелектричних рідин або газів.


Вплив фізичних параметрів середовища (температура, густина) може спричиняти похибки в показаннях.

Актуальність у застосуванні: Застосування витратомірів у різних галузях (промисловість, енергетика, комунальне господарство) дозволяє забезпечувати ефективний контроль витрати рідин і газів, що є важливим для оптимізації виробничих процесів.

Тенденції розвитку: Вдосконалення сучасних витратомірів включає інтеграцію мікропроцесорних систем для автоматизації вимірювань, підвищення точності та створення умов для дистанційного моніторингу і передачі даних.

## Контрольні запитання до теми 13

1. Що таке витрата речовини, і які одиниці вимірювання використовуються для об'ємної та масової витрат?
2. Як обчислюється перехід від об'ємної до масової витрати речовини?
3. Які основні типи витратомірів використовуються у промисловості?
4. У чому суть принципу роботи витратомірів змінного перепаду тиску?
5. Як діафрагми, сопла і сопла Вентурі використовуються для вимірювання витрати рідини або газу?
6. Що таке витратоміри змінного рівня і в яких умовах вони застосовуються?
7. Як працюють ротаметри, і які переваги вони мають для вимірювання витрат рідин і газів?

- 
8. Що таке електромагнітні витратоміри, і для яких середовищ вони підходять найкраще?
  9. У чому полягає принцип дії ультразвукових витратомірів і які їх основні переваги?
  10. Як ультразвукові витратоміри використовують ефект Доплера і різницю часу проходження сигналу?
  11. Що таке швидкісні витратоміри, і які їх ключові особливості?
  12. Як крильчасті і турбінні лічильники працюють для визначення витрати рідини?
  13. У чому полягають особливості роботи анемометрів для вимірювання швидкості газового потоку?
  14. Як працюють об'ємні лічильники рідини і газу, такі як лічильники з овальними шестернями?
  15. У чому переваги і недоліки вагового методу вимірювання витрати сипучих матеріалів?
  16. Як працюють автоматичні порційні ваги з перекидним ковшем для сипучих речовин?
  17. Які принципи закладені в роботу автоматичних конвеєрних ваг і для яких матеріалів вони застосовуються?
  18. Як зменшується похибка під час вимірювання витрати за допомогою сучасних витратомірів?
  19. Які фактори впливають на точність вимірювання витрати рідин і газів?
  20. Як вибирається тип витратоміра залежно від фізичних властивостей середовища?

### **Використана література до теми 13**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
3. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: навчально-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабіченка. Харків: Мірошніченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.
4. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, метрологія та управління якістю: навчальний посібник / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.
5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.



6. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. [та ін.] Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Ун-т нові-тніх технологій; НАУ, 2017. 496 с.

7. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.

8. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 521 с.

9. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та за-соби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.

## ТЕМА 14. АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ЇХ ЗАСТОСУ- ВАННЯ

Основи аналого-цифрового перетворення сигналів. Види аналого-цифрових перетворювачів. Характеристики АЦП: роздільна здатність, швидкодія. Похибки у процесі перетворення сигналів. Використання АЦП у вимірювальних пристроях. Особливості застосування АЦП у цифрових приладах. Висновки

### 14.1. Структурна схема цифрового вимірювального приладу. Дискретизація у часі та квантування за рівнем

Цифрові засоби вимірювальної техніки виникли через потреби практики в суттєвому підвищенні точності, швидкодії і чутливості засобів вимірювань. У свою чергу, їх висока швидкодія та точність привели до нагромадження великих масивів даних про результати вимірювань, що стимулювало здійснення повної автоматизації складних процедур прямих, опосередкованих, сукупних і сумісних вимірювань на основі засобів обчислювальної техніки. Необхідність в повній автоматизації різноманітних виробничих процесів та експериментальних досліджень з опрацюванням, накопиченням, передаванням на значні відстані і реєстрацією результатів вимірювань стало потужним стимулом у розвитку елементної бази цифрової вимірювальної техніки - мікроелектроніки.

Сьогодні цифрові засоби охоплюють практично всі вимірювані в промисловості та наукових дослідженнях фізичні величини. З метою уніфікації елементної бази та забезпечення зручності в користуванні, фізичним носієм вимірювальної інформації у них вибрані електричні сигнали, найчастіше напруга постійного струму, які мають ряд незаперечних переваг перед рештою сигналів, а саме: універсальність, дистанційність, наявність добре розроблених методів та засобів опрацювання, можливість реєстрації швидкоплинних процесів, простота узгодження із засобами цифрової обчислювальної техніки (комп'ютерами).

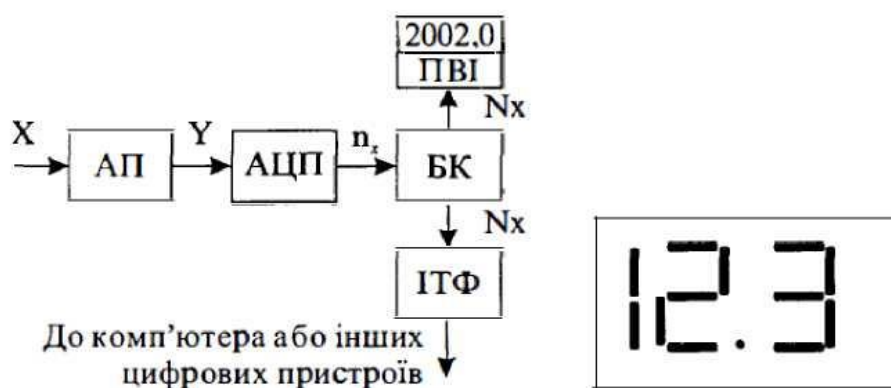


Рисунок 14.1 - Узагальнена структурна схема цифрового вимірювального приладу

Цифрові засоби вимірювальної техніки (рис. 14.1) в загальному випадку складаються із вхідного аналогового перетворювача (АП) вимірюваної фізичної величини  $X$  в електричну вихідну величину  $Y$ , аналого-цифрового перетворювача (АЦП), обчислювального та керуючого блоку (БК), пристроїв відображення інформації (ПВІ) і стандартного (може бути і декілька, які працюють за різними стандартами обміну інформацією) інтерфейсу (ІТФ), що і визначило їх основну роль у вимірювально-обчислювальних комплексах.

З погляду функціонального призначення цифрові засоби вимірювальної техніки розділяються на аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), цифрові вимірювальні прилади та цифрові вимірювальні системи.

В аналого-цифровому перетворювачі здійснюються три базові операції над вхідною величиною: її часова дискретизація, квантування за рівнем і кодування отриманих квантованих значень. Дискретизація сигналу означає заміну неперервної в часі величини її окремими вибірками, взятими в певні моменти часу (рис. 14.2, а). Суть квантування полягає у заміні неперервних значень сигналу в області його інтенсивності (рівня) квантованими (дозволенними) значеннями - подібно як при заокругленні чисел (рис. 14.2, б).

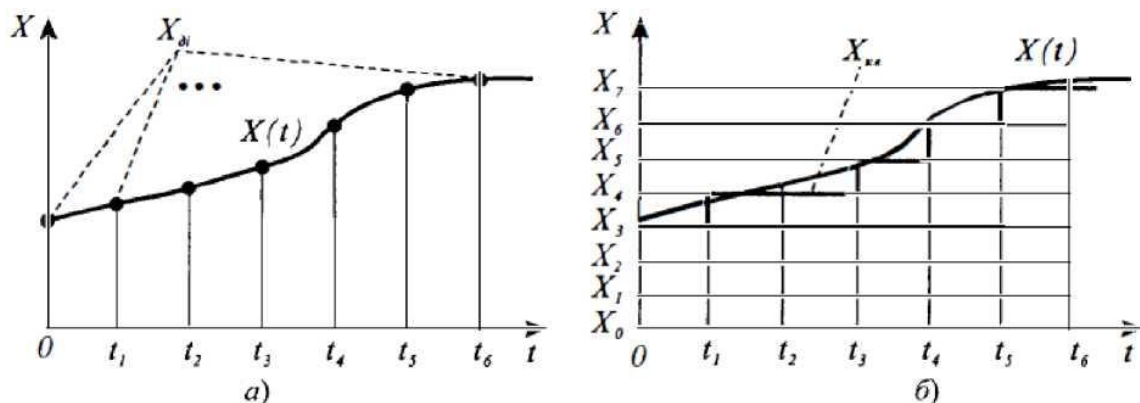



Рисунок 14.2 – Дискретизація в часі та квантування за рівнем вимірюваної величини

Квантований номер, що відповідає вибірці вхідної величини в певний момент часу, зображується певним кодом і подається цифровим сигналом, який в більшості практичних випадків незалежно від використовуваної системи числення є бінарним, тобто подається лише двома різними рівнями. Загалом АЦП не мають відлікових і (або) реєструвальних пристроїв і є базовою частиною складніших приладів або вимірювально-обчислювальних систем. Сучасні інтелектуальні АЦП можуть видавати вихідні сигнали також і в аналоговому виді, здебільшого уніфікованих стандартних сигналів напруги або постійного струму.



ЦАП призначені для зворотного перетворення кодових сигналів в пропорційні їм аналогові (напругу, струм, кут, тощо). Вони застосовуються при побудові деяких АЦП, формування кодо-керованих зразкових сигналів, а також (разом з вихідними підсилювачами, фільтрами, оберненими перетворювачами, тощо) для створення аналогових сигналів, які використовують для збудження об'єкта дослідження.

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) є засобами вимірювань у повному розумінні цього слова, вони автоматично видають числове значення вимірюваної величини на цифровому відліковому пристрої (цифровий індикатор, табло, дисплей тощо). В сучасних інтелектуальних цифрових приладах у блоці обчислення, побудованому на основі однокристальних мікроконтролерів, для визначення результату вимірювання у цифровій формі відбуваються такі вимірювальні операції, як корекція похибок (адитивних, мультиплікативних та нелінійних складових) вимірювального тракту, лінеаризація загальної функції перетворення, цифрова фільтрація та усереднення тощо.

Цифровими вимірювальними системами (ЦВС) називають сукупність вимірювальних каналів, вимірювальних пристроїв та інших технічних засобів, об'єднаних для створення та аналізу сигналів цифрової вимірювальної інформації про декілька одно- чи різнорідних вимірюваних величин та інших видів інформації.

Вимірювальний канал - це сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів зв'язку та інших технічних засобів, призначених для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану величину. Як правило, вимірювальний канал є складовою частиною вимірювальної системи.

Інтерфейс - це сукупність технічних і програмних засобів, а також правил (протоколів) для здійснення одно- або ж двостороннього обміну інформації між цифровими засобами. Через інтерфейс, як правило, забезпечується зв'язок із зовнішніми цифровими пристроями - ЕОМ, цифровими друкарними пристроями, засобами відображення вимірювальної інформації, пам'яттю тощо.

В багатьох сучасних цифрових приладах передбачений аналоговий вихідний сигнал, здебільшого, у вигляді стандартних уніфікованих сигналів постійного струму або напруги постійного струму для використання в системі керування технологічними процесами, для передачі на значні відстані, для здійснення аналогового відображення або реєстрації вимірювальної інформації, яке для оператора при наявності багатьох вимірюваних величин є більш інформативним порівняно з цифровим.

Основними перевагами ЦВП є:

- висока швидкодія - до сотень мільйонів вимірювань за секунду, що об'єктивно вимагає використання засобів обчислювальної техніки для опрацювання результатів вимірювань;

- висока точність, яка, за умов наявності автоматичного калібрування і опрацювання результатів перетворень, може наближатися до точності робочих еталонів одиниць фізичних величин;
- відсутність суб'єктивних складових похибки відліку, наявність яких (при обмеженій довжині шкали) лімітує максимально можливу точність аналогових приладів;
- наявність кодового вихідного сигналу є зручним для його опрацювання, запам'ятовування, реєстрації і передачі на великі відстані без похибок та корекцією збоїв;
- можливість зменшення складових похибки вимірювального кола, в тому числі і систематичних, автоматичними калібруваннями і (або) уведенням поправок. Причому, в багатьох випадках, апаратна частина ЦВП не змінюється, переробляється тільки програмне забезпечення і перепрограмується постійні запам'ятовувальні пристрої, що особливо зручно в ЦВП для наукових досліджень;
- можливість забезпечення високої завадостійкості перетворення аналог-код за допомогою цифрової фільтрації результатів перетворень;
- можливість визначення статистичних параметрів вимірюваних процесів на базі програмної реалізації відомих теоретичних математичних залежностей.

До недоліків ЦВП слід віднести певну незручність для оператора у порівнянні даного показу з границями вимірювання. Якщо аналогову інформацію оператор оцінює миттєво, то цифрову - повинен запам'ятовувати та зіставляти з границями вимірювання. Час зчитування показів та імовірність помилок при цьому зростає, що й послужило основною причиною для використання аналогових засобів вимірювань на диспетчерських пультах складних технічних об'єктів, наприклад, електростанцій.

## 14.2 Аналого-цифрове перетворення

Найважливішим вузлом будь-яких цифрових вимірювальних засобів є АЦП, від метрологічних параметрів якого прямо залежать параметри вимірювального засобу в цілому. При аналого-цифровому перетворенні, у загальному випадку, виконуються операції дискретизації вимірюваної величини в часі, квантування її за рівнем та кодування у певній системі числення.

У дискретному сигналі відсутні проміжні значення вхідного сигналу між мітками часу  $t_i$  та  $t_{i+1}$ . Завдяки цьому може втрачатися вимірювальна інформація про проміжні значення сигналу, тобто виникає похибка від дискретизації. Крім того, завжди існує певна, не нульова, тривалість аналого-цифрового перетворення сигналу, яка залежить від використовуваного методу перетворення та швидкодії елементної бази АЦП. Тому під час дискретизації сигналу можна розглядати дві часові характеристики цього

процесу: (1) - часовий інтервал поміж між почерговими вимірюваннями сигналу (при сталому часі його називають періодом дискретизації сигналу  $T_d = t_{i+1} - t_i$ ; і (2) - інтервал часу  $T_{a/ц}$  аналого-цифрового перетворення сигналу - час, який необхідно затратити, щоб отримати один цифровий результат вимірювання сигналу. Відповідно до цього при цифрових вимірюваннях розглядають похибки двох різновидів (рис. 4.3):

- 1) похибка  $\Delta T_d(t)$ , що пов'язана зі зміною вимірюваного сигналу за час між окремими вибірками (інтервал дискретизації);
- 2) похибка  $\Delta T_{a/ц}(t)$ , що пов'язана зі зміною сигналу за час його аналого-цифрового перетворення.

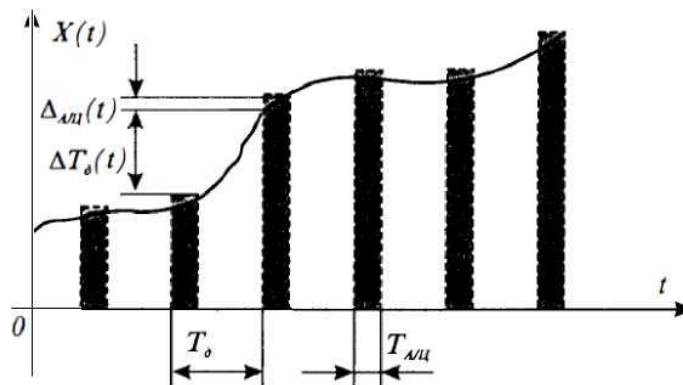


Рисунок 14.3 - Похибки дискретизації при аналого-цифровому перетворенні

При відомому періоді дискретизації перша складова похибки однозначно залежить від властивостей зміни вимірюваного сигналу і способу наступного використання результатів його вимірювань.

Якщо до отримання наступної вибірки  $X_{i+1}$  за поточне значення сигналу  $x(t)$  приймається стале значення, яке дорівнює значенню попередньої вибірки  $X$ , (відтворення сигналу подібною до сходинок функцією (рис. 14.4)), то найбільша похибка пропорційна до найбільшої зміни сигналу на проміжку  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$  між почерговими вибірками

$$|\Delta_{дс}(T_d)| \leq |x'(t)|_{max} T_d.$$

Якщо при гармонійному сигналі амплітудою  $x_m$  і частотою  $\omega$ :  $|x'(t)|_{max} = \omega x_m$ , то максимальна похибка дискретизації не перевищує значення

$$|\Delta_{дс}(T_d)| \leq \omega x_m T_d.$$

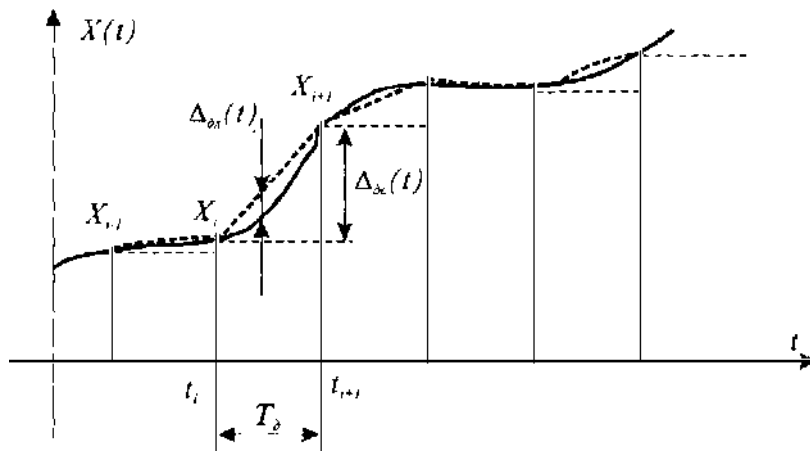


Рисунок 14.4 - Похибка дискретизації при відтворенні сигналу лінійними функціями

Цю похибку можна зменшити, якщо зачекати до моменту часу  $t_{i+1}$  отримання наступної вибірки  $X_{i+1}$  і апроксимувати залежність зміни сигналу між почерговими вимірюваннями лінійною функцією (рис. 14.4).

В цьому випадку максимальне значення похибки залежить від максимальної другої похідної сигналу (при лінійній зміні сигналу похибка відсутня)

$$|\Delta_{\text{дс}}(T_{\text{д}})| \leq \frac{|x''(t)|_{\text{max}}}{2} \left(\frac{T_{\text{д}}}{2}\right)^2.$$

І для гармонійного сигналу, для якого  $|x''(t)|_{\text{max}} = \omega^2 x_{\text{м}}$ , максимальна динамічна похибка від дискретизації не перевищує значення

$$|\Delta_{\text{дс}}(T_{\text{д}})| \leq \frac{x_{\text{м}}}{2} \left(\frac{\omega T_{\text{д}}}{2}\right)^2.$$

Квантування за рівнем вимірюваної величини  $X$  полягає у визначенні квантованого і заокругленого в результаті квантування значення даної величини

$$x_{\text{кв}} = N_x q$$

де  $N_x q$  - квантовий (дозволений) рівень, до якого заокруглюється значення вимірюваної величини;  $N_x$  - число значення;  $q$  - крок квантування (різниця між сусідніми рівнями квантування).

Як наслідок цього, цифровий результат містить похибку заокруглення, яку стосовно фізичних величин (а також внаслідок певних відмінностей заокруглення від загально прийнятих в математиці) називають похибкою квантування. Отже, похибка квантування - це різниця між заокругленим результатом вимірювання та справжнім значенням вимірюваної величини (рис. 14.5).

$$\Delta_{\text{KB}} = x_{\text{KB}} - X = N_x q - X.$$

Спосіб заокруглення до квантового рівня значною мірою визначається технічною реалізацією АЦП. Для різних значень вимірюваної величини похибка квантування змінюється періодично, у вигляді зубців пили (рис. 14.5). Використовують заокруглення до ближчого рівня (рис. 4.5,а), більшого рівня (рис. 4.5,б) чи меншого рівня (рис. 4.5,в). При заокругленні до ближчого квантового рівня (рис. 4.5,а) похибка квантування найменша, вона не перевищує половини кроку квантування

$$|\Delta_{\text{KB}}| \leq \frac{q}{2}.$$

а при заокругленні до більшого чи меншого рівнів вона може досягати розміру кванту з різним знаком.

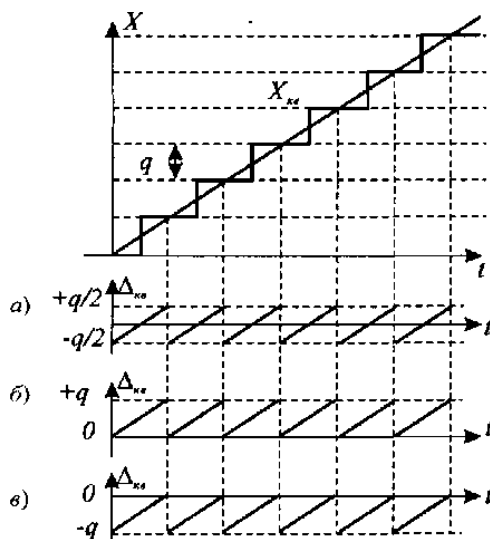


Рисунок 14.5 - Похибки квантування

Останній (молодший) розряд заокругленого результату вимірювання не обов'язково мусить змінюватися через десяткову одиницю, як це є звичайно в математиці. На практиці молодший розряд в певних випадках може набувати лише парних значень (тобто результат вимірювання закінчується цифрами 0; 2; 4; 6; 8) або набувати значення через 5 (тобто закінчуватися цифрами 0 та 5).

Із збільшенням номінального значення ступенів квантування  $N_H$  та із зменшенням тривалості циклу дискретизації  $T_{\text{ц}}$  складність і вартість ЦВП суттєво зростають. Тому кількість ступенів квантування  $N_H$  та тривалість циклу дискретизації слід вибирати за заданими значеннями похибки вимірювання і швидкодії. На сучасному етапі складність і вартість ЦВП може бути суттєво знижена використанням малогабаритних та порівняно недорогих інтегральних АЦП.

## АЦП “частота - код”

АЦП подібного виду являють собою основу для побудови цифрових частотомірів, а також самостійних АЦП, призначених для уведення частоти або сигналів, модульованих по частоті, у комп'ютер. Принцип дії цього АЦП заснований на визначенні частоти, як кількості імпульсів (або кількості періодів періодичного сигналу) в одиницю часу, і пояснюється на рис. 14.6.

Із вхідного періодичного сигналу (наприклад, синусоїди, як показано на рис.14 б) формувач утворить послідовність імпульсів, частота яких дорівнює частоті вхідного сигналу. Ключ відкривається на певний час, що задається генератором стабільної частоти  $a_0$  й дільником частоти. Дільник частоти виконаний перемикаючим із тим, щоб мати можливість змінювати час вимірювань  $T_{\text{и}}$  залежно від вимірюваної частоти й бажаної точності результату.

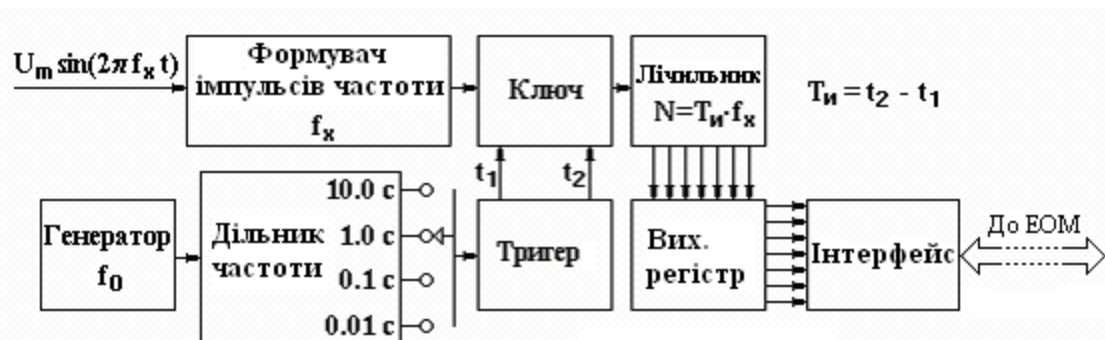


Рисунок 14.6 – Принцип дії перетворювача «частота-код»

Лічильник накопичує минулі крізь ключ імпульси в кількості  $N = T_{\text{и}} f_x$  й тим самим формує код, двійковий або десятковий - залежно від його пристрою. Двійковий код передається потім у вихідний реєстр і далі через пристрої інтерфейсу, постачені гальванічною розв'язкою, - у комп'ютер.

Оскільки в даному АЦП вимірювання виконується за допомогою рахунку імпульсів, неминуха абсолютна погрішність вимірювання, рівному одному імпульсу. Відносне значення цієї погрішності дорівнює відношенню періоду вимірюваної частоти  $T_x = 1/f_x$  до часу вимірювання  $T_{\text{и}}$ , тобто  $1/(T_{\text{и}} f_x)$ .

Якщо при цьому під час вимірювання вимірювана частота змінювалася, то результатом вимірювання буде середнє значення частоти за цей час.

В остаточному підсумку погрішність подібного АЦП викликається наступними причинами:

- нестабільністю частоти генератора  $f_0$ , що задає час вимірювань,
- співвідношенням між вимірюваною частотою  $f_x$  й часом вимірювання  $T_{\text{и}}$ .

Для таких АЦП нормується основна відносна погрішність межею допущених значень:

$$\gamma \leq \left( \gamma_{f_0} + \frac{1}{T_{\text{из}} f_x} \right) \cdot 100\%$$

де  $\gamma_{f_0}$  - відносна погрішність (нестабільність) частоти  $f_0$  .

Динамічною характеристикою АЦП "частота - код" є час вимірювання. Погрішність датування відліків подібних АЦП не перевищує часу вимірювання.

### АЦП "інтервал часу - код"

АЦП даного типу застосовуються для перетворення в код інтервалу часу між двома імпульсами або тривалості імпульсів. У тому числі подібні АЦП можуть використовуватися для перетворення в код періоду періодичного сигналу з подальшим обчисленням частоти цього сигналу, як величини, зворотної періоду. Таке перетворення займає набагато менше часу, чим перетворення частоти в код, описане вище. Принцип дії подібного АЦП показаний на рис.14.7.

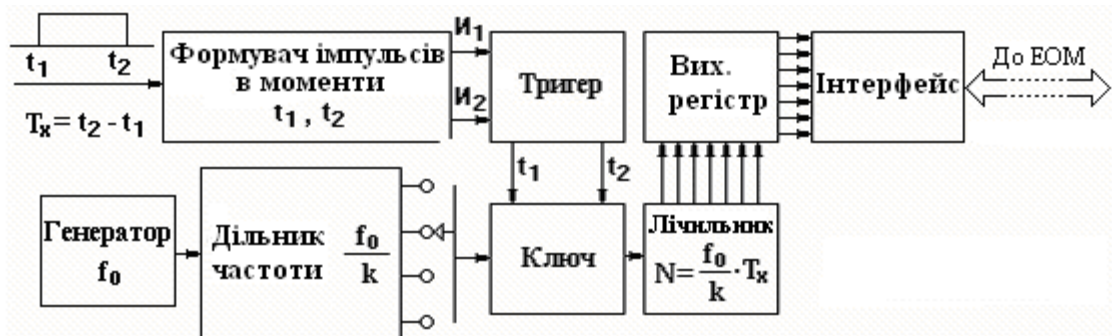


Рисунок 14.7 – Принцип дії перетворювача «інтервал часу - код»

У моменти  $t_1, t_2$  початку й закінчення інтервалу часу, що підлягає вимірюванню, формувач виробляє імпульси, які надходять на вхід тригера, що відкриває ключ на час  $T_x = t_1 - t_2$  . За цей час ключ пропускає на лічильник  $N = \frac{f_0}{k} T_x$  імпульсів від дільника стабільної частоти, і в цьому лічильнику формується код, що потім передається у вихідний регістр і далі через інтерфейсне сполучення й гальванічну розв'язку - у комп'ютер.

Походження погрішностей цього АЦП ті ж. Абсолютна погрішність рахунку імпульсів частоти, що заповнює вимірюваний інтервал, дорівнює одному імпульсу. Відносна погрішність дорівнює відношенню періоду частоти  $T_0 = \frac{k}{f_0}$  інтервалу часу  $T_x$  , тобто  $\frac{k}{f_0 T_x}$  . Тому для таких АЦП нормується основна відносна погрішність:

$$\gamma \leq \left( \gamma_{f_0} + \frac{1}{T_{\text{из}} f_0} \right) \cdot 100\%$$

Тривалість циклу перетворення такого АЦП дорівнює тривалості вимірюваного інтервалу часу, і погрішність датування відкликів її не перевищує. Щодо цього застосування подібних АЦП для вимірювання частоти шляхом вимірювання періоду найчастіше, ніж застосування АЦП "частота - код".

### Інтегруючі АЦП

Інтегруючі АЦП призначені для перетворення в код повільно мінливої напруги із придушенням перешкод від мережі живлення. Із цією метою першою дією таких АЦП є інтегрування вхідної напруги протягом цілої кількості періодів перешкоди. У цей час на вхід інтегратора подається вимірювана напруга (рис. 14.8). Якщо запуск АЦП відбувся в момент часу  $t_1$ , то момент закінчення інтегрування є  $t_2 = t_1 + n \cdot T$ , де  $T$  - період напруги перешкоди.

Оскільки частота напруги мережі незначно коливається відносно 50 Гц, і АЦП живляться від мережі, моменти початку й кінця інтегрування синхронізуються від мережі, і тому час інтегрування в точності дорівнює цілому числу періодів напруги мережі:  $T_{int} = t_2 - t_1 = nT$ .

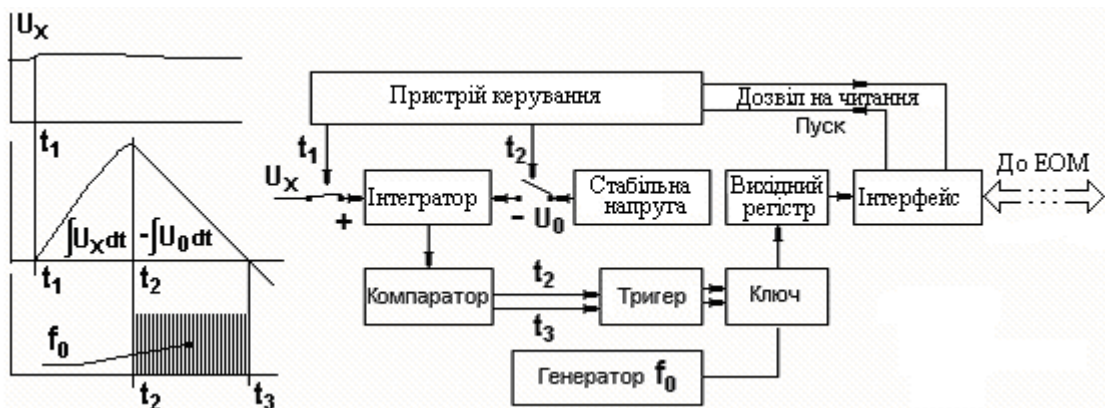



Рисунок 14.8 – Принцип дії інтегруючого АЦП

У момент закінчення інтегрування  $t_2$  вхідні кола інтегратора перемикаються так, щоб на його вхід замість вимірюваної напруги  $U_x$  надійшло стабілізовану напругу  $U_0$  із протилежним знаком (що умовно показано на рис. 14.8). Починаючи із цього моменту, з напруги, отриманої в результаті інтегрування, починає відніматися лінійна напруга, що є продуктом інтегрування постійного стабілізованої напруги  $U_0$ . Компаратор фіксує момент часу кінця інтегрування вхідної напруги  $t_2$  й момент часу  $t_3$ , коли сумарна напруга виявляється рівним нулю. У результаті інтервал часу  $t_3 - t_2$  виявляється прямо пропорційним інтегралу від вхідної напруги, обчисленому за попередній інтервал часу. Якщо за цей час напруга  $U_x$ , вільна від перешкоди, не змінювалося, то цей інтеграл у свою чергу прямо пропорційний вимірюваній напрузі й дорівнює  $nTU_x$ . Тому інтервал часу  $t_3 - t_2$  прямо пропорційний напрузі  $U_x$ , і в остаточному підсумку для завершення



перетворення залишається лише перевести цей інтервал часу в код, передбачивши множення на коефіцієнт пропорційності. Це робиться за рахунок підбора частоти  $f_0$ , який заповнюється інтервал часу  $t_3 - t_2$ .

По закінченню описаних процедур пристрій керування формує сигнал, що дозволяє читання результату з вихідного регістра АЦП.

Із принципу дії інтегруючого АЦП треба, що мінімальний час перетворення не може бути менше 40 мс. Гранично досяжна погрішність подібних АЦП досягає 0.001% і краще.

Основна погрішність таких АЦП нормується межею допущеної відносної погрішності, вираженою двочленною формулою.

Основна область застосування інтегруючих АЦП - створення на їхній основі цифрових вимірювальних приладів підвищеної точності.

### **Метрологічні характеристики АЦП**

Відповідно до ДСТ 8.009 метрологічними характеристиками АЦП є

1. діапазон зміни вхідної напруги,
2. вид вихідного коду й кількість розрядів,
3. вхідний опір,
4. ціна одиниці молодшого розряду вихідного коду,
5. межа допущеної основної погрішності (як правило, відносною, нормованою двочленною формулою),
6. межі допущеної додаткових погрішностей,
7. тривалість циклу перетворення (або максимальна частота перетворень).

У деяких випадках до цих характеристик додаються

8. інтегральна нелінійність,
9. диференціальна нелінійність.

### **14.3. Цифро-аналогове перетворення**

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) призначені для перетворення коду керування в напругу або струм. Використовуються ЦАП як вузли зворотного зв'язку АЦП та для формування вихідних сигналів цифрових вимірювальних і обчислювальних пристроїв.

Для перетворення двійкового коду в аналоговий сигнал зазвичай формуються струми, пропорційні до ваг розрядів коду, і потім підсумовують ті із струмів, які відповідають ненульовим (одичним) розрядам вхідного коду. Спрощена структура ЦАП подана на рис. 14.9. Опорна напруга П0 ЦАП подається одночасно на всі двійково-вагові резистори,  $2^0R, 2^1R, \dots, 2^iR, \dots, 2^{n-1}R, 2^{(n-2)}R$ , інші виводи яких під'єднані до входів перемикача струмів ПС. Один вихід цього перемикача з'єднаний із спільною шиною, в той час як інший - з входом перетворювача струму на напругу (операційний підсилювач ОП та резистор зворотного зв'язку  $R_{33}$ ).

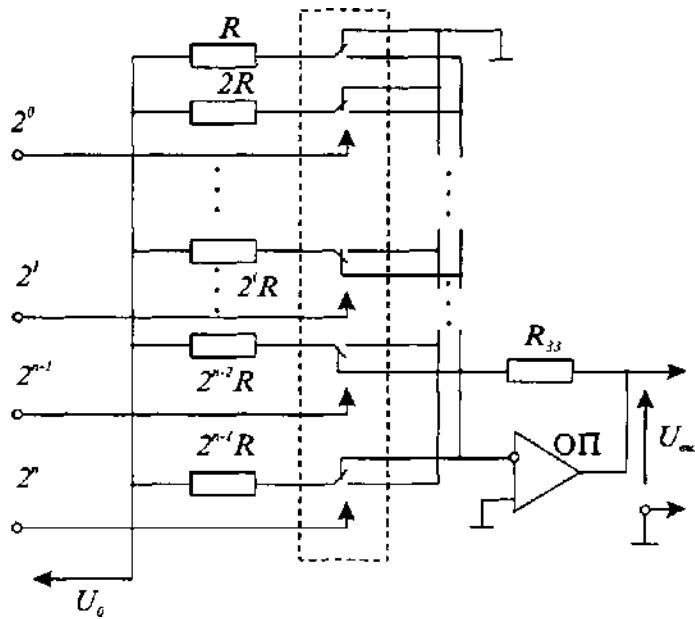


Рисунок 14.9 - Спрощена структура ЦАП з підсумовуванням розрядних струмів

Завдяки такому включенню незалежно від поданого коду керування через  $i$  – й ваговий резистор  $2^i R$  завжди протікає струм  $I = \frac{U_0}{2^i R}$ , який за наявності одиниці в  $i$  – му розряді вхідного коду  $N$  замикається через резистор  $R_{33}$ , а в протилежному випадку стікає на спільну шину. Вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  ЦАП визначається як падіння напруги на резисторі  $R_{33}$  від суми струмів  $I_i$ .

$$U_{\text{вих}} = U_0 \sum_{i=1}^{n-1} a_i \frac{R_{33}}{2^i R} = U_0 \frac{N}{N_{\text{max}}},$$

де  $a_i$  - комутаційний коефіцієнт ( $a_i = 1$ , якщо в  $i$ -тому розряді вхідного коду  $N$  є одиниця і  $a_i = 0$  - у протилежному випадку);  $N$ ,  $N_{\text{max}}$  - відповідно, вхідний код керування та його максимальне значення.

Проблемами описаного ЦАП є велика кількість прецизійних резисторів з різними номіналами, а також обмеженість мінімального значення опору  $R$  ЦАП через вплив опорів замкнених ключів ПС, суттєвий вплив опорів ізоляції для багаторозрядних ЦАП.

Ці недоліки усунені в ЦАП з матрицею  $R - 2R$ , принцип дії якої полягає у поділі удвічі струмів у кожному її вузлі (рис. 14.10). При виготовленні резистивна матриця РМ підганяється за допомогою лазера із врахуванням дійсних значень опорів замкнених ключів, що дає можливість досягнення високих метрологічних параметрів (зведена похибка  $\pm(0,001 \dots 0,1)\%$ ). Завдяки малим розмірам РМ в інтегральній мікросхемі і температури, і температурні коефіцієнти, і часові дрейфи всіх резисторів приблизно однакові, що забезпечує високі температурну та часову стабільність

таких ЦАП. ЦАП формує два вихідні струми -  $I_i$  пропорційний до коду керування  $N$  та  $I + 2 = I_{1max} - I_1$ , де  $I_{1max}$  - максимальне значення вхідного струму  $I_1$  яке відповідає максимальному значенню коду  $N_{max}$ .

Вихідний струм  $I_1$  ЦАП протікає через резистор  $R_{33}$  зворотного зв'язку і формує його вихідну напругу  $U_{вих}$

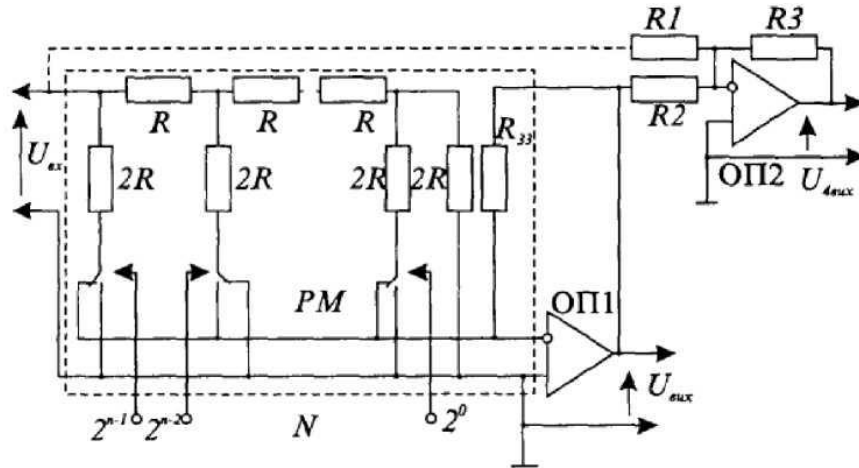


Рисунок 14.10 - ЦАП з резистивною матрицею R-2R

$$U_{вих} = -U_{вх} \frac{N}{N_{max}}$$

де  $U_{вх}$  - вхідна напруга ЦАП.


Джерелами погрішності ЦАП є: неточність виготовлення опорів, нестабільність робочого струму й нестабільність живлення. Крім того при перемиканнях ключів виникають перехідні процеси. Тому потрібна затримка на час загасання цих процесів між моментом подачі вхідного коду й моментом зчитування значення вихідного сигналу.

### Метрологічні характеристики ЦАП.

1. Кількість розрядів.
2. Діапазон зміни вихідного сигналу.
3. Характеристики основної погрішності.
4. Характеристики додаткових погрішностей.
5. Ціна одиниці молодшого розряду вхідного коду.
6. Час установлення вихідного сигналу при зміні вхідного коду.
7. Вихідний опір.

Крім перерахованих можуть додатково нормуватися наступні характеристики.

8. Інтегральна нелінійність - максимальне відхилення значень функції перетворення ЦАП від номінальної лінійної функції, нормується в % від верхнього значення вихідного сигналу.



9. Диференціальна нелінійність - погрішність одиниці молодшого розряду вхідного коду, нормується в % від верхнього значення вихідного сигналу.

У рідких випадках для контролю роботи ЦАП може бути передбачена індикація вхідних кодів. Для цієї мети служать дешифратор й індикатор.

Застосування ЦАП:

- при побудові аналого - цифрових перетворювачів,
- при побудові калібраторів постійного і змінного струму й напруги, опору, сили струму, ємності, індуктивності й ін.,
- при побудові систем регулювання й моделювання,
- у техніці відтворення цифрового запису звуку й відеозображення.

Іноді ЦАП може застосовуватися як добутковий пристрій для перемножування значення сили струму  $I_0$  на вхідний код.

#### **14.4 Кодування інформації. Види кодів цифрових приладів та систем**

Кодування результату аналого-цифрового перетворення - це операція його представлення за допомогою сукупності (кодових) символів вибраного алфавіту (системи числення), що здійснюється за однозначними правилами. При цьому переважно використовується числове кодування і для цифрових вимірювань це є операція переведення числового значення даної величини  $N_x$  в іншу систему числення. Незалежно від використовуваної системи числення, результати перетворення АЦП переважно представляються бінарними символами, тобто лише двома різними рівнями. Зворотня операція має назву декодування.

Крім безпосереднього кодування результатів аналого-цифрового перетворення, у вимірювальній техніці кодування використовується у пристроях відображення результатів, а також з метою отримання певного рівня завадостійкості при передачі результатів каналами зв'язку.

Кожен закодований результат зображується певною кількістю кодових символів або кодовою комбінацією, яка відповідає правилам використовуваного коду. При цьому існують різні системи кодування, які, однак, використовують одні і ті ж кодові символи.

Цифровим кодом називається сукупність правил, які встановлюють значення кожного елемента залежно від його місця в кодовій комбінації та її довжини.

За способом передачі інформації коди бувають: паралельні, послідовні, паралельно-послідовні.

У послідовних кодах інформація передається по одній лінії із розподіленням у часі. При використанні паралельних кодів інформація передається або по кільком лініям одночасно, або по одній лінії, але із частотним розподіленням сигналів.

У багатьох цифрових вимірювальних приладах застосовується біт—паралельна, байт—послідовна передача. Тобто є вісім каналів, по ним виконується одночасна передача байтів інформації. Це паралельно- послідовні коди.

За ступенем захищеності коди бувають захищені від завад та незахищені. У цифрових приладах застосовуються коди, незахищені від завад. Захищені коди використовуються при передачі інформації на відстань (наприклад, у інформаційно-вимірювальних системах).

Коди, що незахищені від завад

У вимірювальній техніці найчастіше використовується такі цифрові коди, як: одиничний нормальний, одиничний позиційний, двійковий нормальний, ціла група двійково-десяткових кодів, код Грея (в АЦП з перетворенням просторових (кутове чи лінійне положення) параметрів), та інші, які зручні для реалізації різноманітними цифровими пристроями (табл.14.1).

Таблиця 14.1 - Цифрові символи первинних цифрових кодів загального використання

Десятковий код	Одиничний нормальний код	Одиничний позиційний код	Двійковий нормальний код	Двійково-десятковий код
0	1	0000000000	00000	0000 0001
1	11	0000000001	00001	0000 0010
2	111	0000000010	00010	0000 0011
3	1111	0000000100	00011	0000 0100
4	11111	0000001000	00100	0000 0101
5	111111	0000010000	00101	0000 0110
6	1111111	0000100000	00110	0000 0111
7	11111111	0001000000	00111	0000 1000
8	111111111	0010000000	01000	0000 1001
9	1111111111	0100000000	01001	0000 1010
10	11111111111	1000000000	01010	0001 0000

Одиничний нормальний (число-імпульсний) код - значення числа подається кількістю імпульсів.

Одиничний позиційний код - значення числа подається положенням одиниці серед нулів.

Десятковий код (основою є число 10) - значення числа подається у десятковій системі числення цифрами від 0 до 9 з вагами, пропорційними 10 у відповідному степені, наприклад,  $733 = 7 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0$ .

Двійковий нормальний код (основою є число 2) - у цьому коді значення числа подається у двійковій системі числення послідовністю п двійкових цифр  $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_2, a_1, a_0$  кожна з яких може мати лише значення  $a_i = 0$  та 1, наприклад, 10011101, при цьому вага цифри у числі дорівнює числу два у степені, яка визначається номером (позиції) розряду

$$N = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0 = \sum a_i \cdot 2^i.$$

Перевод будь-якого десяткового числа у іншу систему зчислення здійснюється шляхом послідовного ділення чисел на основу цієї системи та виписування залишків, які і складають число у іншій системі.

Наприклад, число  $27_{(10)}$  можна легко перевести у двійковий еквівалент шляхом ділення на 2

$$27:2 = 13 \quad \text{залишок } 1;$$

$$13:2 = 6 \quad \text{залишок } 1;$$

$$6:2 = 3 \quad \text{залишок } 0;$$

$$3:2 = 1 \quad \text{залишок } 1;$$

$$1:2 = 0 \quad \text{залишок } 1.$$

Читаємо залишок знизу в гору та отримуємо число  $21_{(10)} = 11011_{(2)}$

Це число переводиться у десяткову систему наступним чином:

$$\begin{aligned} 11011_{(2)} &= 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 16 + 8 + 0 + 2 + 1 \\ &= 27_{(10)}. \end{aligned}$$

Недоліком двійкового коду є те, що при переході від одного сусіднього числа до іншого змінюються одразу усі розряди кодової комбінації. Наприклад,  $7_{(10)} \rightarrow 8_{(10)}$ . У двійковій системі це  $0111_{(2)} \rightarrow 1000_{(2)}$ . Це може призвести до значних помилок при проходженні завади. Захищений від цього недоліку двійковий рефлексний код (код Грея).

Для його утворення двійковий код даного числа зсувається на один розряд праворуч та додається із вихідним по правилу mod2 (додавання без переносу одиниць у старші розряди).

Двійковий код незручний з-за своєї громіздкості при вводі та виводі інформації. На практиці отримали поширення коди, які легко зводяться до двійкового, але зберігають переваги десяткових. До них відносяться шістнадцятковий, вісімковий та двійково-десятковий коди. Останній отримав найбільше розповсюдження у вимірювальній техніці. Суть коду полягає в тому, що кожна цифра десяткового числа подається його чотирьох розрядним двійковим кодом 8-4-2-1. Наприклад, число 393:

$$393_{(10)} \rightarrow 0011 \quad 1001 \quad 0011.$$

Двійково-десяткові коди у межах тетради можуть мати не тільки двійкові ваги 8421, а й інші, наприклад, 4221, 2421, 5211 тощо.

Зміщений двійковий код утворюється введенням додаткового старшого розряду, запис в яких активного одиничного рівня означає додатне число, а запис нуля - від'ємне.

Доповняльний код буває двох типів - прямий та зворотний. Прямий з доповненням до двох має однакові зі зміщеним кодом стани вагових розрядів. Проте додатні числа кодуються нулем у старшому розряді, а від'ємні - одиницею. Нормалізовані додатні числа утворюються підсумовуванням вагових коефіцієнтів розрядів, а від'ємні - підсумовуванням вагових коефіцієнтів з мінус одиницею. Зворотний з доповненням до двох код має подвійне відтворення нуля. Для додатних чисел подання в доповняльному та зворотному кодах збігається з поданням у прямому.

## Коди, захищені від завад

Усі коди, які захищені від завад, характеризуються коефіцієнтом надлишковості  $k$ :

$$k = \frac{m}{n}$$

де  $n$  - кількість інформаційних символів кодової комбінації;

$m$  - загальна кількість символів комбінації, що передається.

Чим вища захищеність коду, тим вищий коефіцієнт надлишковості.

Завадо захищені коди розділяються на дві великі групи: коди з виявленням помилок та коди з виявленням та виправленням помилок.

Розглянемо деякі види кодів з виявленням помилок.

Код із перевіркою на парність утворюється шляхом додавання до комбінації, що передається, одного надлишкового символу (0 або 1) так, щоб загальна кількість одиниць у комбінації була парною.


Коди з виявленням та виправленням помилок характеризуються подальшим підвищенням коефіцієнту надлишковості. До таких кодів відносяться коди Хеммінга та циклічні коди. Ці коди є коректуючими, тобто вони дозволяють по кодовій комбінації, яка є у надлишковості, виявляти та виправляти помилки.

## Висновки

АЦП та ЦАП є невід'ємною частиною сучасної електроніки та вимірювальних систем. Їх вибір залежить від вимог до точності, швидкодії та енергоефективності. Розвиток технологій сприяє підвищенню точності, розширенню динамічного діапазону та зменшенню енергоспоживання.


## Контрольні запитання до теми 14

1. Що таке аналого-цифрове перетворення і які його основні етапи?
2. Які типи аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) існують і чим вони відрізняються?
3. Що таке дискретизація сигналу у часі та квантування за рівнем?
4. Які основні похибки виникають при аналого-цифровому перетворенні сигналів?
5. Що таке роздільна здатність АЦП і як вона впливає на точність вимірювань?
6. Як швидкодія аналого-цифрового перетворювача визначає його застосування?
7. Що таке інтервал дискретизації сигналу і як він впливає на похибку вимірювання?
8. У чому суть заокруглення величини під час квантування і яка його максимальна похибка?
9. Як працюють АЦП типу "частота-код" та "інтервал часу-код"?

- 
10. Які принципи лежать в основі інтегруючих АЦП, і які їх основні переваги?
  11. Які метрологічні характеристики використовуються для оцінки АЦП?
  12. Що таке цифрово-аналогові перетворювачі (ЦАП) і які їх основні типи?
  13. Як працює ЦАП з підсумовуванням розрядних струмів, і які у нього переваги?
  14. Що таке інтегральна та диференціальна нелінійність ЦАП?
  15. Як ЦАП використовуються у цифрових вимірювальних і обчислювальних пристроях?
  16. Що таке кодування інформації і які типи кодів використовуються у цифрових системах?
  17. Які переваги і недоліки має двійковий код порівняно з іншими системами числення?
  18. Що таке код Грея і як він допомагає зменшити вплив помилок при передачі даних?
  19. У яких випадках використовуються завадозахищені коди і як вони працюють?
  20. Як сучасні технології впливають на точність і швидкодію АЦП та ЦАП?


#### **Використана література до теми 14**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
3. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: навчально-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабіченка. Харків: Мірошниченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.
4. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, метрологія та управління якістю: навчальний посібник / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.
5. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
6. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. [та ін.] Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. 496 с.
7. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.



8. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 521 с.

9. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та за-соби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.



## ТЕМА 15. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ: ПРИНЦИПИ РОБОТИ І ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ. ВИМІРЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Основні компоненти цифрових вимірювальних приладів. Принцип роботи цифрових вольтметрів і амперметрів. Аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворення у цифрових приладах. Роль мікроконтролерів у цифрових вимірювальних системах. Вимірювання якості електричної енергії. Використання програмного забезпечення для обробки даних. Висновки.

### 15.1 Цифрові вимірювальні прилади, загальні положення


Цифрові вимірювальні прилади це такі пристрої, в яких чисельне значення вимірюваної величини відображається як ряд значень представлених в тій чи іншій формі.

Слід зазначити, що у цифрових вимірювальних приладах можна вручну керувати процесом вимірювання (у разі пасивного вимірювання параметрів електричних кіл, які називається вимірювальними мостами і у випадку активного вимірювання параметрів - компенсатори) і автоматично. Однак, в даний час, під цифровими вимірювальними приладами зазвичай розуміють цифровий пристрій, в якому процес вимірів здійснюється автоматично.

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) зазвичай мають більш складну структуру, ніж аналогові і можуть складатися з декількох відносно автономних вузлів. Наприклад, вони, можуть, складатися з декілька попередніх вхідних блоків, які як правило включають в себе пристрій автоматичного вибору межі виміру, засобів автоматичного вибору та визначення полярності вимірюваної величини, пристрою корекції систематичної похибки, пристрою захисту від перевантаження і т. д. Крім того, ЦВП часто включають в себе блоки аналогових перетворювачів, метою якої є трансформація вхідною вимірюваної величини в іншу, аналогове, числове значення якого є більш ефективно (наприклад, з більшою швидкістю визначення, з меншою споживчою потужністю, більш дешевшим способом).

В якості аналогових величин, які безпосередньо піддаються процесу отримання його числового значення, в ЦВП більшість часто використовують часовий інтервал, частоту або кількість імпульсів, а також постійні напругу (струм). Також необхідно звернути увагу, що в деяких випадках це є простішим і зручнішим отриманням числових значень лінійних переміщень або кута обертання.

Перевага використання для безпосереднього вимірювання часового інтервалу є простота отримання точної одиниці (міри) порівняння у вигляді періоду повторення імпульсів генератору з кварцованою частотою стабілізації.



Перетворення вимірюваної величини в частоту або число імпульсів дозволяє дуже просто потримати числові значення звичайним підрахунком числа імпульсів за зразковий інтервал часу, який також легко реалізується за допомогою імпульсів, які стабілізуються кварцовим генератором. А використання постійною напруги (струму) в якості величини, яка піддається безпосередньо операції отримання її числового значення, дає можливість реалізації максимальної продуктивності.

В сучасних ЦВП процес порівняння вимірюваного значення з мірами і отримання її числового значення повністю автоматизований, блок ЦВП, що реалізує цей процес, отримав назву аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Отримання цифрового еквіваленту аналогового значення може бути здійснено тільки в результаті дискретизації (квантування) цього значення на рівні, яке визначає так звану похибку квантування. Часто її вважають, специфічною методичною похибкою, характерною для цифрових вимірювальних приладів.

Похибка квантування є випадковою величиною, яка рівномірно розподіляється по в діапазоні від  $-q/2$  до  $+q/2$ , де  $q$  є кроком квантування що дорівнює величині молодшому розряду значення результату. Як правило інструментальна похибка цифрового пристрою не повинна перевищувати його похибку квантування.

При вимірюванні процесів, тобто значення, які змінюються під впливом часу, надзвичайно важливим є прив'язати його результативне значення до моменту часу виміру. Визначення цих моментів часу називається дискретизації величини вимірюваної в часі і похибка у її визначенні, наслідком якої є вплив на подальшу обробку цих значень, підвищення точності кінцевого результату.

Таким чином, при практичному використанні цифрових вимірювальних приладів важливо розрізнити похибку квантування, яка визначається дискретністю по рівню значення вимірюваної величини, яка відноситься до похибки статичної, тобто похибки, яка виникає при виміру величин, які не змінюються за часом при вимірюванні і похибки динамічній, яка додатково відбувається за рахунок зміни значення вимірюваної величини за час одного виміру. Перша визначається тільки властивістю вимірювального приладу себе тільки, а третя - ще і характеристикою вимірюваного сигналу.

Основними характеристиками цифрових вимірювальних приладів є:

- інструментальна статична похибка, яка нормується двочленною формулою;
- похибка квантування, яка задається числом розрядів пристрою який відраховує значення виміру;
- швидко чинність;
- ліміт вимірювання;
- вхідний опір;
- споживча потужність;

- апертурний час, який характеризує тимчасове не визначення прив'язування звіту при вимірюванні різних види процесів.

Добуток апертурного часу на похідну вимірюваного сигналу у відправній точці підрахунку визначає максимальну динамічну похибку вимірювання. Для зменшення динамічної похибки у блоці пристроїв вводу цифрових вимірювальних приладів часто включають так званій пристрій вибірки та зберігання (ПВЗ), який є по суті аналоговим ЗП, який запам'ятовує миттєві значення сигналу виміру у фіксованих точках в часі одного виміру.

Для цифрових вимірювальних приладів, призначених для вимірювання параметрів пасивний електричних величин (опору, ємності, вимірювань індуктивностей т. д.) вхідний опір немає сенсу, так як значення вимірюваної величини не є джерелом електричної енергії, а навпаки, його споживачем.

Саме джерелом енергії є вимірювальний прилад. Для вимірювальних приладів цього виду вказується і нормується значення величини електричного струму або напруги, які з'являється на виміряних пасивній електричній величині під час вимірювання. Знання про ці значення дуже важливо, оскільки вони можуть впливати на вимірюваних параметрів, а іноді може призвести до незворотних змін.

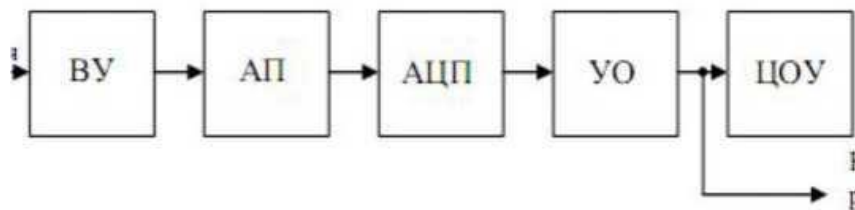



Рисунок 15.1 - Узагальнена структурна схема цифрових вимірювальних приладів

де ВУ- блок пристрій вводу, до якого входять пристрій вибору межі виміру, пристрій визначення та вибір полярності значення вимірювання, пристрій збільшення вхідного опору цифрового пристрою та його завадостійкості тощо.

АП - блок аналогового перетворення, в якому відбувається конвертування аналогового сигналу в аналоговий сигнал іншого виду, найзручніший процес для отримання числових значень вимірюваної величини. У практичному використанні АП, у більшості випадків вхідний сигнал перетворюється в напругу постійного струму, часового інтервалу проміжок часу, а також частоту або число електричних імпульсів.

АЦП - блок аналого-цифрового перетворення, в якому виконуються основні вимірювальні операції - дискредитація часу, квантування по рівню і кодування рівня аналогової величини яка вимірюється в тій чи іншій системі урахування.



УО - устрій обробки, в якому може відбуватися проста попередня обробка вимірювання результатів, наприклад:

- обчислення частоти по виміряному періоду у частотомірах низьких і інфранизьких частот;
- обчислення середнього значення зрушення фаз в цифрових фазометрах;
- обчислення середнього значення результатів серій вимірювань, яке дає можливість зменшити випадкову компоненту похибок вимірювань;
- здійснення цифрового методу корекції дрейфу параметрів вимірювального приладу з метою зменшення систематичної похибки вимірювання.


ЦОУ - блок устрій цифровою обробки, зазвичай включає в себе рідкокристалічні, газорозрядні або світлодіодні індикатори, схеми управління цими індикаторами, а також перетворювачі кодів чисел з системи числення, в якій безпосередньо отримується числовий еквівалент величини що виміряється у код числа, який необхідний правильній роботі індикатора що використовується.

Як правило, у всіх сучасних цифрових вимірювальних приладах передбачається виведення результатів вимірювання на реєструючи пристрої того чи іншого типу, або безпосередньо до комп'ютера. Також відзначимо, що блок АЦП присутній в будь-якому типі цифрового пристрою вимірювання, на відміну від усіх інших блоків, присутність яких обумовлена конкретним типом пристрою.

Існують дві області цифрових вимірювальних приладів. Перша область - використання їх в якості пристроїв вводу в вимірювально-обчислювальних комплексів (віртуальних вимірювальних приладах, SCADA - системах (Supervisory for Control And Data Acquisition - диспетчерське управління та збір даних), а друга - використання їх в якості автономних цифрових вимірювальних приладів в лабораторії або виробництві.

У першому випадку результат вимірювання використовуються технічними пристроями для автоматичної обробки інформації, у другому - результат вимірювання призначений для безпосереднього людського розуміння. Ці обставини призвели до деяких відмінностей між цифровими пристроями, які розробляються для цих двох областях застосування, а саме:

- В цифрових вимірювальних приладах, призначених для безпосереднього використання людиною, числові значення вимірюваної величини формується або безпосередньо у десяткову або двійкову систему відліку для спрощення послідового перетворення в десяткову систему, найзручніший для людини. У цифрових вимірювальних приладах, які використовуються в різних роду автоматизованих системах збору та обробки даних, формування числового значення вимірюваної величини відбувається в двійковій системі, придатній для подальшої комп'ютерної обробки.



- Цифрові вимірювальні прилади, призначені для роботи з людиною не потребує великої бистої дії, тому що людина не здатна поглинати інформацію більше 10 біт/с. В той же час для цифрових вимірювальних приладів, призначених для роботи в системах з подальшою автоматичною обробкою вимірювальної інформації, швидкість її обробки є одна з найбільш важливих експлуатаційних характеристик.

- Цифрові вимірювальні прилади призначені для роботи безпосередньо з людиною, обов'язково повинні мати відлікові пристрої, які показують отриманий результат вимірювання у десятковій системі відліку. Цифрові вимірювальні прилади, які працюють в системах з подальшою обробкою, або не мають звітних пристроїв, або мають його в якості допоміжного вузла, що використовується при налаштуванні системи або її ремонту, при чому із індикація здійснюється у двійковій нотації.

Ці особливості приводять до того, що деякі методи аналого-цифрового перетворення, стають більш переважні при використанні цифрових вимірювальних пристроїв іншій сфері.

Звідси випливає з усього вище перерахованого, основним блоком цифрового вимірювального пристрою є блок аналого-цифрового перетворення (АЦП), в якому чиниться формування числового еквіваленту вимірюваної величини.

Завдяки блокам великомасштабного перетворення вимірювана та зразкова величина можуть брати участь у процесі порівняння, отже, формування числового значення вимірюваної величини, як безпосередньо, так і у вигляді дрібних (або кратних) значень. Послідовність формування цих дрібних (або кратних) значень цих величин і порівняння їх між собою визначає алгоритм проведення процесу виміру.

## 15.2 Цифровий частотомір середніх значень

Принцип дії цифрового частотоміра середніх значень оснований на підрахунку кількості імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий часовий інтервал часу  $t_0$ . Частота  $f$  періодичного сигналу - це фізична величина, значення якої визначають як кількість коливань в одиницю часу.

Структурна схема частотоміра містить такі основні блоки:

$RS$  - тригер,  $SW2$  - схема збігу;

$G$  - генератор стабільної частоти;

ПЧ - подільник частоти, що формує зразковий часовий інтервал  $T_0$ .

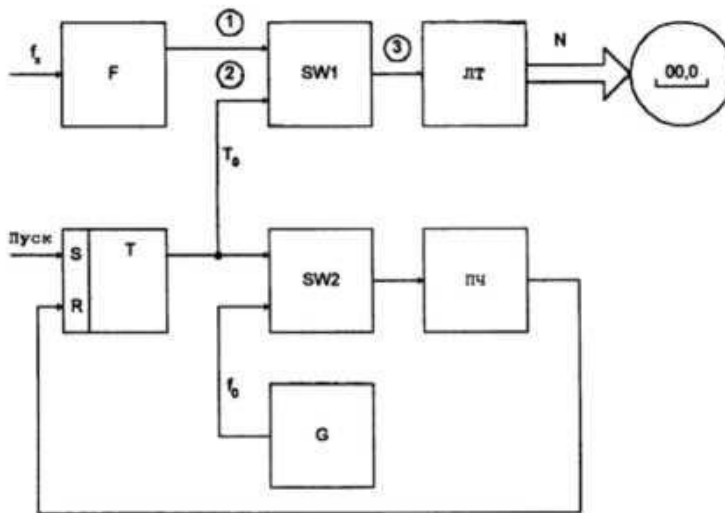


Рисунок 15.2 - Структурна схема частотоміра середніх значень

Лічильник ЛТ, який підраховує кількість імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий інтервал часу  $t_0$ ; схему збігу  $SW1$ , де здійснюється квантування зразкового часового інтервалу імпульсами невідомої частоти. Формувач імпульсів  $F$ , який із вхідних сигналів формує прямокутні імпульси, калібровані за амплітудою і тривалістю.

За командою «Пуск» тригер  $T$  встановлюється у стан логічної одиниці і таким чином відкриває схеми збігу  $SW1$  і  $SW2$ . Імпульси, які слідують із частотою  $f_x$  через формувач  $F$  і відкриту схему збігу  $SW1$ , надходять на вхід двійкового лічильника ЛТ, який здійснює їх підрахунок. В цей самий момент часу через відкриту схему збігу  $SW2$  імпульси  $f_0$  з виходу генератора  $G$  стабільної частоти надходять на вхід подільника частоти ПЧ, коефіцієнт розділення якого розраховують з урахуванням забезпечення потрібного часового інтервалу  $t_0$ .

Після закінчення зразкового часового інтервалу заднім фронтом імпульсу  $t_0$  тригер  $T$  встановлюється у стан логічного нуля, схеми збігу  $SW1$  і  $SW2$  закриваються і в лічильнику ЛТ фіксується код  $N$ . Кількість імпульсів невідомої частоти, які підраховує двійковий лічильник за час  $t_0$  визначається:

$$N_i = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{t_0}{T_x} = t_0 F_x,$$

де  $t_1, t_2$  - моменти часу початку та закінчення зразкового часового інтервалу.

Зразковий часовий інтервал формується в подільнику частоти і визначається  $t_0 = kT_0$ , де  $k$  - коефіцієнт ділення подільника частоти;  $T_0$  - період імпульсів зразкової частоти  $f_0$ .

### 15.3 Цифровий фазометр миттєвих значень

Принцип дії цифрових фазометрів оснований на перетворенні різниці фаз двох електричних сигналів однакової частоти у часовий інтервал  $t_x$  із наступним його квантуванням імпульсами опорної частоти  $f_0$ .

Основними елементами фазометра є два формувача  $F1$  і  $F2$ ,  $RS$ -тригери, схема збігу  $SW$ , генератор  $G$ , двійковий лічильник  $ЛТ$  і цифровий пристрій - показчик. Перетворення різниці фаз двох електричних сигналів  $U_1$  і  $U_2$  з частотою  $f_x$  у часовий інтервал  $t_x$  здійснюють відповідні формувачі  $F1$ ,  $F2$  і  $RS$ -тригер.

Квантування часового інтервалу  $t_x$  імпульсами опорної частоти  $f_0$  відбувається за допомогою схеми збігу  $SW$ .

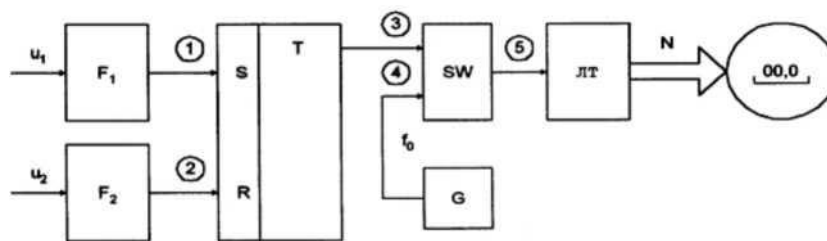


Рисунок 15.3 - Структурна схема цифрового фазометра миттєвих значень

### 15.4 Цифровий вольтметр часового-імпульсного перетворення

Принцип дії оснований на перетворенні вимірюваної напруги  $U_x$  в часовий інтервал  $t_x$ , з наступним його квантуванням імпульсами зразкової частоти  $f_0$ .

Основним елементом структури вольтметра є перетворювач вимірюваної напруги  $U_x$  у часовий інтервал  $T_x$ , що реалізований на двох компараторах ПП1 і ПП2, генераторі напруги, що лінійно змінюється,  $G1$  і  $RS$ -тригері  $T$ .

Квантування часового інтервалу  $T_x$  імпульсами опорної частоти  $f_0$ , сформованими на виході генератора  $G2$ , здійснюється в схемі збігу  $SW$ . Двійковий лічильник  $ЛТ$  підраховує кількість імпульсів  $f_0$  за час  $T_x$ . Результат вимірювання відображається на цифровому індикаторі.

У момент часу  $t_0$  сигналом «Пуск» запускається генератор напруги  $G1$ , що лінійно змінюється, виробляє сигнал  $U_r$ , який подається на входи компараторів ПП1 і ПП2, що по черзі спрацьовують у моменти часу  $t_1$  і  $t_2$ .

При переході напруги  $U_r$  через рівень нуля (момент часу  $t_1$ ) спрацьовує компаратор ПП2 і на його виході формується імпульс «Старт», що по  $S$ - входу встановлює в одиничний стан тригер  $T$ . Рівнем логічної одиниці

відкривається схема збігу  $SW$  і імпульси опорної частоти  $f_0$  з виходу генератора  $G2$  надходять на вхід лічильника ЛТ. Напряга  $U_r$  на виході генератора  $G1$  зростає, поки не стане рівною  $U_x$ .

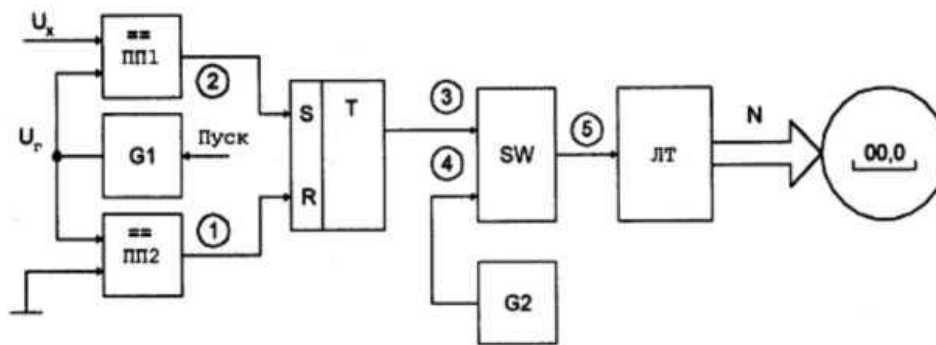


Рисунок 15.4 - Структурна схема цифрового вольтметра часового-імпульсного перетворення

Момент рівності  $U_r = U_x$  в момент часу  $t_2$  фіксує компаратор ПП1 шляхом формування на своєму виході сигналу «Стоп».

Сигналом «Стоп» по  $R$  - входу компаратор встановлює тригер  $T$  в нульовий стан і закриває схему збігу  $SW$ . На цьому процес вимірювання  $U_x$  закінчується.

Таким чином, на виході тригера  $T$  формується часовий інтервал  $T_x$ , пропорційний вимірюваній напрузі  $U_x$ , під час якого формується одиничний імпульс, що відкриває схему збігу  $SW$ , і імпульси опорної частоти  $f_0$  із виходу  $G2$  надходять на вхід лічильника. Кількість імпульсів з частотою  $f_0$ , що надходять на лічильник ЛТ за час  $T_x$ , визначається

$$N_B = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{T_x}{T_0} = T_x f_0.$$

Оскільки  $T_x = kU_x$  ( $k$  - коефіцієнт пропорційності, який залежить від крутості напруги, що лінійно змінюється), то рівняння перетворення  $N_B = F(U_x)$  цифрового вольтметра набуває вигляду

$$N_B = kU_x f$$

Залежність похибки квантування від вимірюваної напруги та крутості лінійно-змінюваної напруги.

Крім того, похибка таких засобів вимірювань в основному зумовлена нелінійністю та нестабільністю лінійно змінюваної напруги, нестабільністю порога чутливості компаратора і нестабільністю частоти зразкового генератора.

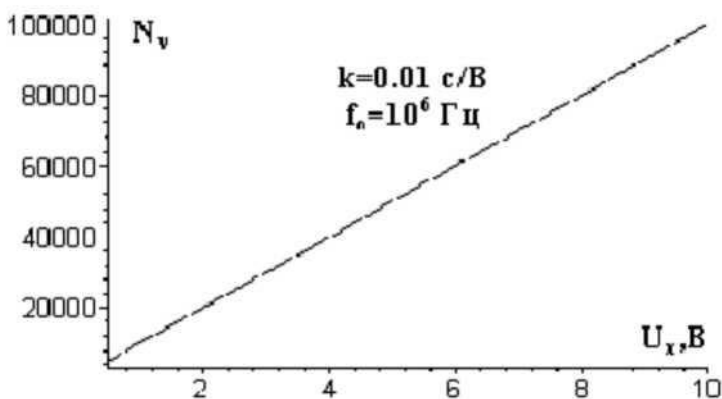


Рисунок 15.5 - Статична характеристика цифрового вольтметра часового-імпульсного перетворення

Суттєвим недоліком цифрового вольтметра часового-імпульсного перетворення є низька завадостійкість. Для підвищення завадостійкості застосовують аналогове та цифрове інтегрування.

### 15.5 Цифрові мультиметри

Узагальнена структурна схема цифрового вимірювального приладу була вже наведена вище на рис. 15.6.

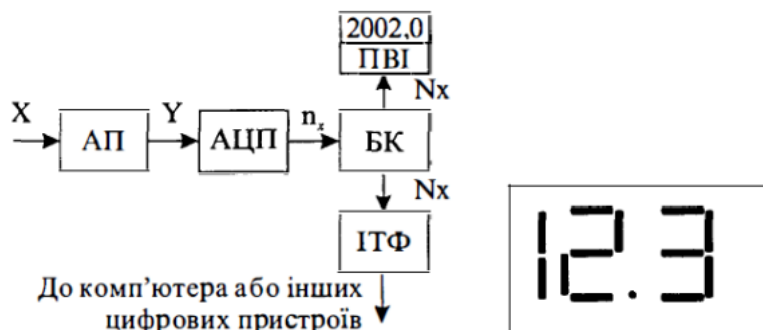


Рисунок 15.6 - Узагальнена структурна схема цифрового вимірювального приладу

Загалом електричні сигнали порівняно з неелектричними значно простіше та точніше передавати, перетворювати (наприклад, підсилювати, фільтрувати, здійснювати відповідні математичні операції тощо), а також перетворювати їх в цифровий електричний сигнал (код), і далі його відображувати, зберігати, опрацьовувати тощо. Тому при вимірюванні неелектричних (фізичних, хімічних та інших) величин  $X$  їх перетворюють за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів у електричні сигнали, найчастіше, в інтенсивність напруги  $U_x$ , частотно-часові параметри

сигналів (в частоту  $f_x$  чи тривалість імпульсів  $T_x$ ), або параметри електричних кіл (електричний опір, індуктивність чи ємність), які далі перетворюються в інтенсивність напруги чи частотно-часові параметри

На рис. 15.7 подана структурна схема цифрового мультиметра, який призначений для вимірювання напруги постійного струму, постійного струму, напруги змінного струму, змінного струму, опору інших фізичних величин, перетворених в напругу постійного струму.

Вимірювані величини під'єднуються до окремих входів мультиметра вибір роду вимірюваної величини, а також її піддіапазону вимірювання здійснюється за допомогою перемикача ПРП.

Кожна з вимірюваних величин або масштабним перетворювачем, або перетворювачами роду фізичної величини перетворюється в уніфікований сигнал напруги постійного струму, яка, у свою чергу, за допомогою АЦП перетворюється в кодовий сигнал  $n$  і подається до блока керування БК.

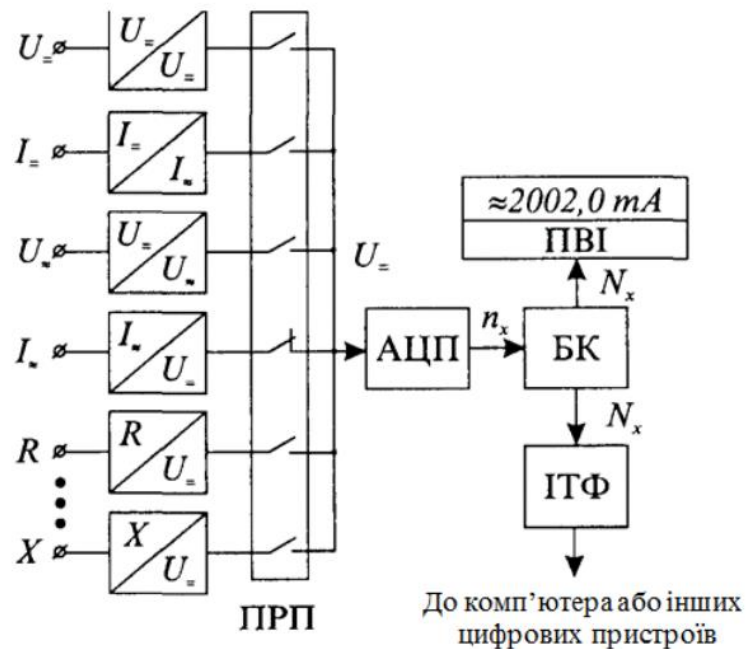


Рисунок 15.7 - Структурна схема цифрового мультиметра

Функціональна схема сучасного цифрового (процесорного) приладу показана на рис. 15.8. Основними пристроями такого приладу є вхідні пристрої (кондиціонер сигналів), АЦП, процесор (мікропроцесор), пристрої відображення, реєстрації та пересилання вимірювальних даних (інтерфейс), пристрої керування, введення даних та команд керування (клавіатура), а також блоки живлення пристрою.

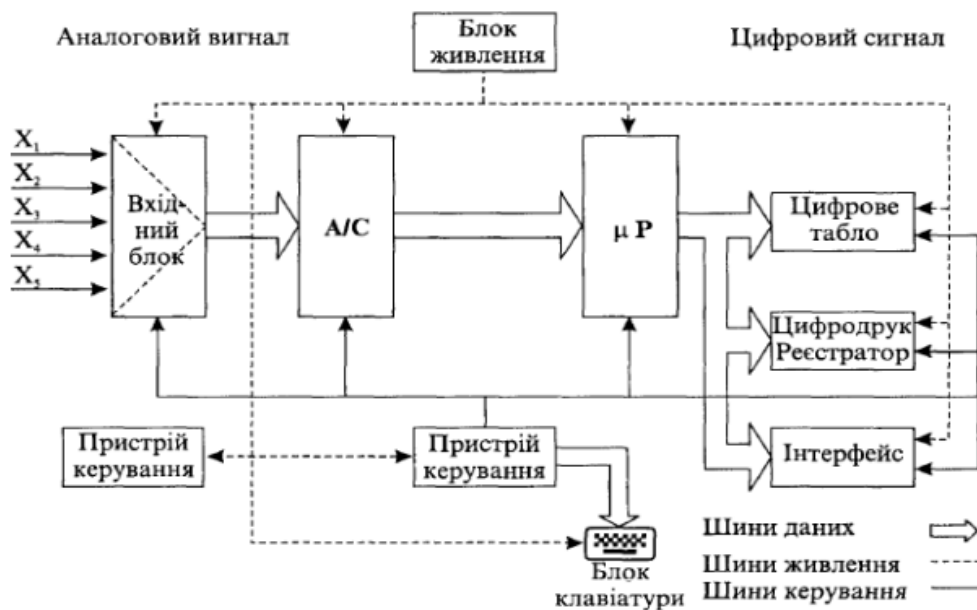


Рисунок 15.8 - Функціональна схема цифрового процесорного приладу

Шляхом різного виду перетворень вхідної величини значення вихідного сигналу вхідного блока доводять до номінального діапазону перетворення АЦП. Останні, здебільшого, виготовляються на заданий діапазон вхідної напруги, наприклад в діапазонах 0-1В; 0-2В; 0-5В; 0-10В або у двополярних діапазонах. Тому незалежно від роду і виду вихідного сигналу вимірювального перетворювача (сенсора) на виході вхідного пристрою мусить бути сформований сигнал із заданими властивостями, найголовніша з яких – це заданий діапазон її зміни. Цей елемент вимірювального каналу називають нормалізуючим перетворювачем, чи перетворювачем з уніфікованим вихідним сигналом. Останнім часом в зарубіжній літературі з вимірювальної техніки такі пристрої називають кондиціонерами сигналів, а відповідні вимірювальні операції називаються кондиціонуванням вимірювального сигналу. Дослівно англійський термін *conditioning* – означає покращувати стан, а термін *conditioned* – відповідний нормі чи стандарту. Тобто кондиціонований сигнал – це сигнал, що відповідає встановленим нормам.

Всі цифрові операції з опрацювання результатів перетворень АЦП здійснюються в мікропроцесорі відповідно до вибраної програми та команд, що можна вводити з клавіатури. Результати можуть відображатися у різній формі, запам'ятовуватися, реєструватися чи пересилатися до інших користувачів. Зазвичай аналогова та цифрова частини приладу гальванічно розділені (трансформаторним чи оптичним розв'язком), чим забезпечується високий рівень захисту від завад спільного виду.

Основні функції, що покладаються на мікропроцесори у вимірювальних приладах:

а) вимірювання – керування АЦ-перетворювачем; лінеаризація функції перетворювання; автоматичний вибір межі виміру; компенсація завад; виключення систематичних похибок;

б) обробка – накопичування масивів вимірювальної інформації; побічне вимірювання; статистична та інші види обробки інформації; стиск даних;

в) керування – приймання керуючих дій оператора; настройка приладу на режим роботи; контроль за діями оператора; видача довідникової інформації; сигналізування у екстремальних ситуаціях;

г) відображення – зберігання результатів попередніх вимірювань; відображення текстової інформації; відображення графічної інформації; допоміжна та сервісна інформація (дата, час і т. п.);

д) інтерфейсні функції – керування інтерфейсом; робота в комплексі із іншими ЦВП;

е) тестові функції – самотестування; калібрування вимірювальних каналів.

Застосування мікропроцесорів (МП) у вимірювальній техніці дозволяє значно підвищити точність приладів, розширити їх можливості, підвищити надійність, дає можливість вирішувати нові задачі. У ряді випадків для ЦВП створюють багатопроцесорну систему керування, у якій здійснюється спеціалізація функцій процесорів: процесор вводу-виводу, процесор керування, процесор обробки інформації та інші

Приклад цифрового мультиметра Fluke 287/FVF рис. 15.9. та його характеристики табл. 15.1



Рисунок 15.9 Цифровий мультиметр Fluke 287/FVF

Таблиця 15.1 - Технічні характеристики.

Напруга постійного струму	похибка	0,025%
	Діапазон і роздільна здатність	50,000 мВ, 500,00 мВ, 5,0000 В, 50,000 В, 500,00 В, 1000,0 В
Змінна напруга	похибка	0,4% (справжні середньоквадратичні значення)
	Діапазон і роздільна здатність	50,000 мВ, 500,00 мВ, 5,0000 В, 50,000 В, 500,00 В, 1000,0 В


Постійний струм	похибка	0,15%
	Діапазон і роздільна здатність	500,00 мкА, 5000,0 мкА, 50,000 мА, 400,00 мА, 5,0000 А, 10,000 А
Змінний струм	похибка	0,7% (справжні середньоквадратичні значення)
	Діапазон і роздільна здатність	500,00 мкА, 5000,0 мкА, 50,000 мА, 400,00 мА, 5,0000 А, 10,000 А
температура (Виключаючи щуп)	похибка	1,0%
	Діапазон і роздільна здатність	- 200,0 ° С до 1090,0 ° С
опір	похибка	0,05%
	Діапазон і роздільна здатність	500,00 Ом, 5,0000 кОм, 50,000 кОм, 500,00 кОм, 5,0000 МОм, 50,00 МОм, 500,0 МОм
ємність	похибка	1,0%
	Діапазон і роздільна здатність	1,000 нФ, 10,00 нФ 100,0 нФ, 1,000 мкФ, 10,00 мкФ, 100,0 мкФ, 1000 мкФ, 10,00 мФ, 100,00 мФ Ом
частота	похибка	0,005% + 1
	Діапазон і роздільна здатність	999,99 кГц

## 15.6 Вимірювання якості електричної енергії

Під якістю електроенергії (ЯЕЕ) розуміють відповідну сукупність її параметрів, які описують особливості процесу передачі ЕЕ для її використання в нормальних умовах експлуатації, визначають безперервність електропостачання (відсутність тривалих чи короткочасних перерв електропостачання) і характеризують напругу живлення (величину, несиметрію, частоту, форму хвилі). До цього визначення потрібно додати ще дві особливості. По-перше: ЯЕЕ в цілому виражається ступенем задоволеності споживача умовами електропостачання, що важливо з практичної точки зору.

По-друге: ЯЕЕ залежить не тільки від умов електропостачання, але й від особливостей електрообладнання, яке застосовується (його чутливості до електромагнітних перешкод (ЕМП), а також можливості їх генерування) і умов експлуатації. Останньою особливістю визначається той факт, що відповідальність за ЯЕЕ повинні нести не тільки організації постачальники, але і споживачі електроенергії та виробники електрообладнання.

Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК) розробляє та затверджує норми ЯЕЕ трьох типів:



- визначальні, які містять опис електромагнітного середовища, термінологію, вказівки щодо обмеження рівнів генерування ЕМП та вимірювання і тестування засобів для визначення показників якості електроенергії (ПЯЕЕ), рекомендації щодо виготовлення електрообладнання;

- загальні норми, в яких приводяться допустимі рівні ЕМП при генеруванні чи в електричних мережах побутового та промислового призначення;

- детальні норми (предметні), які містять вимоги щодо окремих виробів і пристроїв з точки зору ЯЕЕ.

Головною організацією в Європі, яка займається координацією робіт щодо стандартизації в електротехніці, електроніці і суміжних областях знань є Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК).

Слід назвати ще й такі міжнародні організації, як Міжнародна Рада по великим електричним системам високої напруги (CIGRE) та Міжнародний Союз виробників і дистриб'юторів ЕЕ (UNIPED). Впливовою регіональною організацією, яка займається нормалізацією в області ЯЕЕ для країн Євросоюзу (ЄС), є CENELEC ((фр. Comité Européen de Normalisation Électrotechnique) — Європейський комітет електротехнічної стандартизації). Існує ще ряд міжнародних професійних організацій і національних комітетів, які розробляють національні стандарти на ЯЕЕ, як правило, на основі норм МЕК.

В Україні з 1 січня 2000 року введено у дію міждержавний стандарт ГОСТ 13109-97 - «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії у системах загального електропостачання». Наказом Міністерства економічного розвитку України від 20 травня 2014 р. № 573 з 1 жовтня 2014 р. введено в дію ДСТУ EN 50160:2014 [3], який є ідентичним європейському стандарту EN 50160:2010. Але, при цьому міждержавний стандарт ГОСТ 13109-97 не втратив чинності, тобто, в Україні існують два стандарти, в яких є деякі норми щодо якості напруги електропостачання, що суперечать один одному.

ГОСТ 13109-97 встановлює показники і норми ЯЕЕ в електричних мережах систем електропостачання загального призначення змінного трифазного і однофазного струму частотою 50 Гц у вузлах, до яких приєднуються електричні мережі, що знаходяться у власності різних споживачів ЕЕ, або приймачі ЕЕ (у вузлах загального приєднання). При дотриманні визначених цим стандартом норм забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж систем електропостачання загального призначення і електричних мереж споживачів ЕЕ (приймачів ЕЕ).

Норми, встановлені зазначеним стандартом (ГОСТ 13109-97), є обов'язковими у всіх режимах роботи систем електропостачання загального призначення, крім тих, що визначені наступним:

- винятковими погодними умовами і стихійними лихами (ураган, повінь, землетрус та ін.);

- не передбачуваними ситуаціями, які викликані діями сторони, що не є енергопостачальною організацією чи споживачем ЕЕ (пожежа, вибух, військові дії та ін.);

- умовами, що регламентовані державними органами управління, а також пов'язаними з ліквідацією наслідків вище зазначених негараздів.

Якість електроенергії при живленні електроприймачів від енергосистеми визначається стабільністю і рівнями частоти, струму і напруги, а також ступенем несиметрії і несинусоїдальності напруги.

Норми, встановлені цим стандартом, підлягають обов'язковому включенню їх у технічні умови на приєднання споживачів ЕЕ і у договори на користування ЕЕ між останніми та електропостачальниками. Згідно ГОСТ 13109-97 основними показниками ЯЕЕ є:

- стале відхилення напруги  $\sigma U_y$ ;
- розмах зміни напруги  $\sigma U_t$ ,
- доза флікера  $P_t$ ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги  $K_U$ ;
- коефіцієнт п-ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності  $K_2 U$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності  $K_{0U}$ ,
- відхилення частоти  $\Delta f$ ;
- тривалість провалу напруги  $\Delta t_n$ ;
- імпульсна напруга  $U_{\text{імп}}$ ;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги  $K_{\text{пер}U}$ .

Слід зазначити, що розглядаються два види норм на ЯЕЕ: нормально допустимі і гранично допустимі. Оцінка відповідності ПЯЕЕ вказаним нормам проводиться за розрахунковий період, що дорівнює 24 год.

Більшість явищ, що погіршують якість електричної енергії в електричних мережах, відбуваються у зв'язку з особливостями спільної роботи останніх з електроприймачами, їх електромагнітної сумісності. ПЯЕЕ в основному обумовлені втратами (падінням) напруги на ділянці електричної мережі, що живить споживачів. Вони визначаються за виразом:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_{\text{ном}}}$$

Зазначені тут активний (R) і реактивний (X) опір ділянки мережі вважаються постійними, а відповідні їм P і Q потужності, що передаються по ділянці мережі, змінними. Характер цих змін, зазвичай, буває різним, що й викликало необхідність прийняття декількох визначень втрат напруги:

- при повільній зміні навантаження відповідно до його графіка - відхилення напруги;
- при різко змінному характері навантаження - коливання напруги;

- при несиметричному розподілі навантаження по фазах електричної мережі - несиметрія напруги в трифазній системі;
- при нелінійному навантаженні – несінусоїдальності форми кривої напруги.

Від тих явищ, на які споживач електричної енергії впливати не може, йому залишається тільки захищати своє устаткування спеціальними засобами, наприклад, пристроями швидкодіючого захисту або гарантованого живлення.

Відповідальність за підтримання напруги в межах норм, встановлених ГОСТ 13109-97, покладається на енергопостачальну організацію.

Відхилення частоти в першу чергу впливає на навантаження представлене електродвигунами - змінюється їх частота обертання, струм, момент та інтенсивність нагрівання.

В електричних мережах України прийнята частота змінної напруги 50 Гц. У системі електропостачання допускається відхилення частоти (різниця між фактичним та номінальним значенням) не більше ніж на  $\pm 0,2$  Гц (допускається тимчасове відхилення до  $\pm 0,4$  Гц). Для електроприймачів, які приєднані до автономних електростанцій потужністю до 1000 кВт допустиме відхилення частоти становить  $\pm 0,5$  Гц, а для приймачів, які приєднані до електростанцій потужністю до 250 кВт - допустиме відхилення частоти лежить в межах  $\pm 2$  Гц.

Підтримання частоти в заданих межах не є основною задачею електропостачання галузей народного господарства, яке займається лише розподіленням електричної енергії, а не її виробництвом.

Рівень напруги - важливий параметр, що характеризує будь-який елемент електричної мережі. Підтримання необхідного рівня напруги - одна із основних задач електропостачання.


Номінальною ( $U_{nom}$ ) називається така напруга приймачів електроенергії, генераторів і трансформаторів, при якій вони нормально і найбільш економічно працюють, вона вказується в паспорті машини або апарату. Для установок трифазного струму за номінальну напругу приймають значення міжфазної (лінійної) напруги.

Відхилення напруги (стале відхилення напруги) - це алгебраїчна різниця між напругою в будь-якій точці мережі та номінальною напругою мережі. Відхилення напруги - це повільна плавна зміна напруги, зумовлена зміною навантаження. Напруга в мережі змінюється поступово при зміні навантаження на протязі доби, місяця, року. Відхилення напруги вимірюється у вольтах або у відсотках.

Відхилення напруги  $\sigma U$  на початку та в кінці лінії можна визначити за наступними виразами:

$$\sigma U_A = U_A - U_{nom}; \sigma U_B = U_B - U_{nom};$$

де  $U_A, U_B$  - відповідно, напруга на початку та в кінці лінії, В;  
 $U_{nom}$  - номінальна напруга мережі (лінії), В.



Відхилення напруги характеризується показником сталого відхилення напруги  $\sigma U_y$ . Відхилення напруги в тій чи іншій точці мережі відбувається, як вже зазначалося, під впливом повільної зміни навантаження відповідно до його графіка.

Стале відхилення напруги в мережі у відсотках:

$$\sigma U_y = \frac{U_y - U_{nom}}{U_{nom}} \cdot 100\%$$

де  $U_y$  - усереднене значення напруги за одну хвилину.

ГОСТ 13109 - 97 встановлює допустимі значення сталого відхилення напруги на затискачах електроприймача. Межі ж зміни напруги у точці приєднання споживача повинні визначатися з урахуванням падіння напруги від зазначеної точки до електроприймача і вказуватись у договорі на енергопостачання.

Коливання напруги - це швидка стрибкоподібна зміна напруги, яка викликана, наприклад, включенням потужного асинхронного електродвигуна.

Коливання напруги характеризується розмахом ( $\sigma U_t$ ) та частотою зміни напруги ( $F_{\sigma U_t}$ ) й інтервалом часу між змінами напруги ( $\Delta t$ ).

Збільшення напруги на 5% зменшує термін служби ламп розжарювання в 2 рази, але підвищує світловий потік. Зменшення напруги на 5% збільшує термін служби лам розжарювання в 2 рази.

Для асинхронних електродвигунів момент на валу змінюється прямо пропорційно квадрату напруги, тому при зниженні напруги нормально завантажені електродвигуни «перекидаються».

При відхиленні напруги в будь-яку сторону від номінального значення збільшується струм в електродвигуні, що веде до підвищеного нагріву обмотки.


За встановленими нормами, відхилення напруги на затискачах у споживача повинне бути не більше  $\pm 5\%$ . Максимально допустиме короткочасне відхилення напруги до  $\pm 10\%$ .

Номінальна напруга генераторів на 5...10% вища за номінальну напругу мережі і становить (для потужних електростанцій): 6,3; 10,5; 11; 13,8; 15,75; 21,0 та 24,0 кВ.

Вторинна напруга підвищувальних та знижувальних трансформаторів також на 5% вища за номінальну напругу мережі.

Напруга первинної обмотки знижувальних трансформаторів, так як вони є споживачами електроенергії, рівна номінальній напрузі мережі: 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 400, 500 та 750 кВ.

Для підтримання необхідних рівнів напруги у споживачів в системі сільського електропостачання використовують спеціальні пристрої: відга-



луження обмоток трансформаторів, пристрої регулювання напруги під навантаженням, автотрансформатори, мережні регулятори, конденсаторні установки.

Коефіцієнт несиметрії напруги.

Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності  $K_{2U}$  - відношення напруги зворотної послідовності основної частоти до номінальної лінійної (міжфазної) напруги мережі.

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{nom}} \cdot 100\%$$

Коефіцієнт несиметрії напруги по нульовій послідовності  $K_{0U}$  - відношення напруги нульової послідовності основної частоти до номінальної лінійної (міжфазної) напруги мережі.

$$K_{0U} = \frac{U_{02}}{U_{nom}} \cdot 100\%$$

Несиметрія напруги характерна для сільських мереж напругою 0,38/0,22 кВ із переважаючим однофазним навантаженням. У цих мережах навіть нормальні режими роботи часто несиметричні.

В результаті несиметрії відхилення напруги у однофазних приймачів, які приєднані до різних фаз, будуть різними і можуть виходити за допустимі межі. При несиметрії характерна поява складових нульової і зворотної послідовності, що приводить до додаткового нагрівання електродвигунів.

Нормальне значення коефіцієнта несиметрії напруги на затискачах трифазних електроприймачів тривало допускається в межах 2 % і максимально до 4% (короткочасно).

Для зменшення впливу несиметрії на якість напруги необхідно: забезпечити рівномірний розподіл навантаження однофазних споживачів між фазами; потужні споживачі електроенергії підключати на лінійну напругу; збільшувати переріз проводів; встановлювати трансформатори на споживчих ТП 10/0,4 кВ із схемою з'єднання обмоток «зірка-зігзаг-нуль».

Коефіцієнт несинусоїдальності напруги (коефіцієнт П-Ої гармонійної складової напруги  $K_{щп}$ ) - відношення діючого значення гармонійної складової несинусоїдальної напруги до напруги основної частоти.

На затискачах електроприймачів значення коефіцієнта несинусоїдальності напруги тривало допускається в межах 5% і максимально до 10% (короткочасно).

Несинусоїдальність форми кривої напруги приводе до підвищеного нагріву електродвигунів та до збільшення втрат електроенергії в усіх елементах мережі.

Спотворення, що створюються синхронними генераторами і силовими трансформаторами, малі і не роблять істотного впливу на систему електропостачання і на роботу електроприймачів. Головною причиною спотворень є вентиляльні перетворювачі, сталеплавильні електродугові і руднотермічні печі, установки дугового і контактного зварювання, перетворювачі частоти, індукційні печі, ряд електронних технічних засобів (телевізійні приймачі, ПЕОМ), газорозрядні лампи та ін. Електронні приймачі електроенергії і газорозрядні лампи створюють при своїй роботі невисокий рівень гармонійних спотворень на виході, але загальна кількість таких електроприймачів велика.

Для вимірювання параметрів якості електричної енергії використовують спеціалізовані прилади.


Наприклад трифазний реєстратор якості електроенергії Fluke 1734 рис. 15.10.



Рисунок 15.10- Трифазний реєстратор якості електроенергії Fluke 1734

Призначення трифазного аналізатора якості електроенергії Fluke 1734:

Трифазні реєстратори якості електроенергії Fluke 1732 і Fluke 1734 дозволяють легко виявити джерела втрат електроенергії. Визначайте, коли і де на вашому об'єкті споживається енергія – від технологічних входів до окремих ланцюгів. Віддалений доступ і обмін даними з вашої бригадою здійснюється через додаток Fluke Connect, так що ви можете залишатися на безпечній робочій відстані і приймати важливі рішення в режимі реального часу. Це знижує необхідність у використанні захисних засобів, а також у відвідуванні об'єкта і контролі.



Профілювання енергоспоживання на всіх ділянках об'єкту дозволяє виявити можливості для економії електроенергії, а також надає необхідні дані для цього. Новий пакет ПО Energy Analyze дозволяє порівнювати кілька точок даних у часі і створювати повну картину енергоспоживання, що є першим кроком до скорочення витрат на електроенергію.

Особливості трифазного аналізатора якості електроенергії Fluke 1734:

Основні вимірювання: Автоматичне отримання і реєстрація значень напруги, сили струму, потужності, коефіцієнта потужності, споживаної електроенергії і пов'язаних з ними параметрів;

Сумісність з Fluke Connect: Перегляд даних локально на приладі або через мобільний додаток Fluke Connect і програмне забезпечення для настільного комп'ютера або через інфраструктуру WiFi підприємства;

Зручна подача живлення на прилад: Живлення приладу безпосередньо від вимірюваної ланцюга;

Найвищий рейтинг безпеки в галузі: Відповідає стандартам безпеки 600 В CAT IV / 1000 В CAT III для використання на технологічному вході і на більш низьких рівнях;

Вимірювання параметрів всіх трьох фаз: 3 3 гнучкими Струмовимірювальні датчиками в комплекті;

Детальна реєстрація: У приладах можна зберігати більше 20 окремих сеансів реєстрації. Фактично всі виміряні значення реєструються автоматично, так що ви не втратите тенденції вимірювання. Їх навіть можна вивчати під час сеансів реєстрації і перед завантаженням для аналізу в режимі реального часу;


Оптимізований інтерфейс: Швидка, керована графічна настройка дозволяє отримати потрібні дані в будь-який час, а інтелектуальні функції перевірки дозволяють перевірити правильність з'єднань, роблячи роботу користувача більш надійною;

Яскравий кольоровий сенсорний екран: Виконання зручного в польових умовах аналізу, а також перевірок даних з повним графічним відображенням Оптимізований інтерфейс: Отримуйте точні дані кожного разу за допомогою швидких керованих графічних налаштувань, будьте впевнені в правильності з'єднань завдяки функції інтелектуальної перевірки;

Повна настройка в «польових умовах на передній панелі або в додатку Fluke Connect: Немає необхідності повертатися в майстерню для завантаження і установки або нести комп'ютер до електричного шафі;

Повністю інтегрована реєстрація: Підключіть інші пристрої Fluke Connect до Fluke 1734 для одночасної реєстрації двох інших параметрів вимірювання – підтримуються практично будь-які параметри, доступні на бездротовому цифровому мультиметри або модулі Fluke Connect;

Прикладне програмне забезпечення Energy Analyze Plus: Завантажте цей додаток і за допомогою наших автоматично генеруються звітів аналізуйте всі характеристики енергоспоживання.




Області застосування трифазного аналізатора якості електроенергії Fluke +1734:

Дослідження навантажень: Дізнайтеся, скільки енергії споживають окремі установки при роботі на мінімальній і максимальній потужності. Перш ніж підключати додаткові навантаження, перевірте навантажувальну здатність схем (порядок перевірки регулюється низкою стандартів). Дослідження навантаження також дозволяє визначити ситуації, в яких відбувається перевищення допустимого навантаження на ланцюг або узгоджена подача пікового споживання з комунальної системи енергопостачання. Для зручності деякі дослідження навантаження служать для простого вимірювання струму, що дозволяє швидко і легко встановити вимірювальне обладнання. Часто рекомендується проводити дослідження навантаження протягом 30 днів, щоб виявити під час перевірки все типові навантаження.

Оцінка енергоспоживання: визначення споживання енергії до і після внесення поліпшень для підтвердження ефективності енергозберігаючих пристроїв.

Енергетичні обстеження: Користувачі часто запитують, де слід знімати показання для виконання енергетичного обстеження. Це слід робити в декількох точках на підприємстві. Почніть з головних розподільних пристроїв; порівняйте результати вимірювання потужності і енергії з показаннями лічильника комунальної системи енергопостачання, щоб переконатися, що рахунки виставляються правильно. Потім перемістуйтеся нижче в сторону великих навантажень; їх повинно бути легко виявити по току на розподільчих пристроях з боку навантаження від введення енергосистеми. Вимірювання в декількох точках дозволить скласти повну картину енергоспоживання на підприємстві. Наступне питання, яке зазвичай задають користувачі, полягає в тому, як довго слід проводити енергетичне обстеження. Це, зрозуміло, залежить від підприємства, але рекомендується проводити вимірювання протягом періоду, відповідного типового періоду активності підприємства. Якщо підприємство працює протягом п'яти днів в Області застосування тиждень і відключається на вихідні, швидше за все, семиденне обстеження дозволить зафіксувати типові умови. Якщо підприємство працює цілодобово, 365 днів у році, один день дозволяє отримати уявлення про енергоспоживання, виключаючи періоди планового технічного обслуговування. Щоб скласти повну картину енергоспоживання підприємства, не обов'язково виконувати вимірювання одночасно в кожній точці підприємства. Для отримання вичерпної картини можна виконати точкові вимірювання, а потім порівняти результати по ковзній часовій шкалі. Наприклад, можна порівняти результати на вводі в електроустановку за типовий вівторок з 06:00 до 12:00 з результатами на великих навантаженнях на підприємстві. Зазвичай існує кореляція між цими профілями.

Реєстрація результатів супутніх аналогових вимірювань: В ході енергетичного обстеження рекомендується реєструвати результати супутніх аналогових вимірювань таких параметрів, як температура, напруга, струм



або тиск. Ці параметри дають більш повне уявлення про робочих умовах і допомагають узгодити експлуатаційні дані устаткування з енергоспоживанням. Зіставляючи ці параметри, ви отримаєте більшість даних, необхідних для внесення коригувань і перекладу обладнання в більш економічний режим роботи. Для аналогових вимірювань можна задіяти до двох бездротових модулів Fluke Connect, що з'єднуються з приладом Fluke 1734, який буде автоматично реєструвати результати вимірювань разом з показаннями потужності і споживаної енергії.

Реєстрація потужності і споживаної енергії: При підключенні обладнання має певне миттєве споживання потужності у ватах (Вт) або кіловатах (кВт). Ця потужність накопичується протягом робочого часу і виражається як споживана енергія в кіловат-годинах (кВт·ч). Електроенергія – це те, за що виставляє рахунок енергозбутова компанія, що встановлює стандартний тариф за кіловат-годину. Комунальні служби можуть стягувати і інші додаткові збори, такі як за пікове споживання – максимальне споживання потужності за певний період часу, часто 15 або 30 хвилин.


Може також стягуватися збір за коефіцієнт потужності, в залежності від працюючої індуктивної або ємнісний навантаження на підприємстві. Оптимізація пікового споживання і коефіцієнта потужності часто дозволяють знизити щомісячний рахунок за електроенергію. Трифазні реєстратори електроенергії Fluke 1732 і Fluke 1734 здатні виміряти і охарактеризувати ці фактори, надаючи вам можливість проаналізувати результати і заощадити кошти.

Спрощене дослідження навантаження: В ситуаціях, коли буває важко або неможливо підключитися для вимірювання напруги, функція спрощеного дослідження навантаження дозволяє спростити вивчення навантаження шляхом вимірювання тільки сили струму. Користувач може ввести очікуване номінальну напругу, щоб виконати імітацію дослідження потужності. Для точного дослідження потужності і енергії необхідно контролювати напругу і струм, але цей спрощений метод може виявитися корисним при певних обставинах.

Реєстрація загальних параметрів: Призначені для вимірювання найбільш важливих параметрів трифазного живлення, прилади Fluke 1732 і Fluke 1734 можуть одночасно реєструвати середньоквадратичну напругу, середньоквадратичне значення струму, напруга, THD напруги і струму, активну потужність, реактивну потужність, коефіцієнт потужності, активну енергію, реактивну енергію і багато іншого. Завдяки достатньому об'єму пам'яті для реєстрації даних більш ніж за рік, моделі Fluke 1732 і Fluke 1734 можуть визначати, які навантаження слід оптимізувати, щоб зменшити рахунки за електроенергію.

Простота використання трифазного аналізатора якості електроенергії Fluke 1732:

Три датчика струму з'єднані окремо; прилад автоматично виявляє і встановлює масштаб зонди. Тонкі датчики струму призначені для зручно-



сті проходження через вузькі місця між провідниками і легко налаштовуються на 150 або 1500 А для високої точності практично в будь-яких умовах. Інноваційний незапутиваючийся плоский провідник напруги робить підключення простим і надійним, а інтелектуальна функція «Перевірити підключення» дозволяє автоматично перевірити, чи правильно підключений прилад, і виконати цифрову коригування типових проблем підключення без необхідності відключати вимірювальні дроти.

Блок живлення можна зручно і безпечно жити безпосередньо від вимірюваного контуру – більше не потрібно шукати розетки або вести подовжувальні кабелі в точку реєстрації

Завантаження даних ніколи не виконувалася простіше або більш гнучким чином:

Завантажити прямо на флеш-накопичувач USB, який підключається безпосередньо до порту USB приладу;

Віддалений перегляд вимірювань через мобільний додаток і програму для настільного комп'ютера Fluke Connect допоможе вам підтримувати безпечні робочі відстані і зменшить потребу в засобах індивідуального захисту, непотрібних відвідини об'єкта і контролю;

Об'єднання в одному приладі результатів вимірювань параметрів електроенергії та інших даних з техобслуговування заводського обладнання.

Аналіз і складання звіту за допомогою трифазного аналізатора якості електроенергії Fluke 1734:

Отримання зареєстрованих даних – це лише одна частина завдання. Коли у вас будуть всі необхідні дані, потрібно виділити корисну інформацію і скласти звіти, які можна буде легко передати іншим особам в організації або клієнту, і які будуть легко зрозумілі. Програма Fluke Energy Analyze Plus максимально спрощує це завдання. З потужними інструментами аналізу та можливістю створювати власні звітів ви в лічені хвилини зможете передати інформацію про свої знахідки і швидко вирішити проблеми, щоб оптимізувати надійність і економічність системи.

Діапазон = 1000 В x I діапазон

Еталонні умови: – Навколишні умови:  $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , прилад працює не менше 30 хвилин, відсутність зовнішніх електричних / магнітних полів, відносна вологість  $<65\%$ ; - Умови на вході:  $\text{Cos}\phi / \text{PF} = 1$ , синусоїдальний сигнал  $f = 50/60$  Гц, електроживлення  $120/230\text{ В} \pm 10\%$ ; - Характеристики сили струму і потужності: Вхідна напруга 1 фаза:  $120/230\text{ В}$  або 3 фази схема «зірка / трикутник»:  $230/400\text{ В}$  Вхідний струм:  $I > 10\%$  від I діапазон; – Первинний провідник з кліщами або пояс Роговського в центральному положенні; – Температурний коефіцієнт: Додайте  $0,1$  x нормативну точність на кожен градус Цельсія вище  $28^{\circ}\text{C}$  або нижче  $18^{\circ}\text{C}$ .

Таблиця 15.2 - Технічні характеристики Fluke 1734

параметр		Діапазон	Роздільна здатність	Власна похибка при еталонних умовах (% від показання + % повної шкали)	
напруга		1000 В	0,1 В	$\pm (0,2\% + 0,01\%)$	
Струм: пряме введення	i17xx-flex 1500 12 "	150 А	0,1 А	$\pm (1\% + 0,02\%)$	
		1500 А	1 А	$\pm (1\% + 0,02\%)$	
	i17xx-flex 3000 24 "	300 А	1 А	$\pm (1\% + 0,03\%)$	
		3000 А	10 А	$\pm (1\% + 0,03\%)$	
	i17xx-flex 6000 36 "	600 А	1 А	$\pm (1,5\% + 0,03\%)$	
		6000 А	10 А	$\pm (1,5\% + 0,03\%)$	
i40s-EL clamp	4 А	1 мА	$\pm (0,7\% + 0,02\%)$		
	40 А	10 мА	$\pm (0,7\% + 0,02\%)$		
частота		Від 42,5 до 69 Гц	0,01 В	$\pm (0,1\%)$	
допоміжний вхід		$\pm 10$ В постійного струму	0,1 мВ	$\pm (0,2\% + 0,02\%)$	
Мінімальна / максимальна напруга		1000 В	0,1 В	$\pm (1\% + 0,1\%)$	
Струм мінімальний / максимальний		Залежить від приналежності	Залежить від приналежності	$\pm (5\% + 0,2\%)$	
Загальна гармонійне спотворення (THD) напруги		1000%	0,1%	$\pm 0,5$	
Загальна гармонійне спотворення (THD) сили струму		1000%	0,1%	$\pm 0,5$	
параметр	величина впливу	iFlex1500-12	iFlex3000-24	iFlex6000-36	i40S-EL
		150 А / 1500 А	300 А / 3000 А	600 А / 6000 А	4 А / 40 А
Активна потужність P	PF $\geq 0,99$	1,2% + 0,005%	1,2% + 0,0075%	1,7% + 0,0075%	1,2% + 0,005%
Активна енергія Ea	PF $\geq 0,99$	1,2% + 0,005%	1,2% + 0,0075%	1,7% + 0,0075%	1,2% + 0,005%
Повна потужність S	0 $\leq$ PF $\leq$ 1	1,2% + 0,005%	1,2% + 0,0075%	1,7% + 0,0075%	1,2% + 0,005%
Повна енергія Ear	0 $\leq$ PF $\leq$ 1	1,2% + 0,005%	1,2% + 0,0075%	1,7% + 0,0075%	1,2% + 0,005%
Реактивна потужність Q	0 $\leq$ PF $\leq$ 1	2,5% від вимірюваної повної потужності			
Реактивна енергія Er	0 $\leq$ PF $\leq$ 1	11			
Коефіцієнт потужності PF	-	11			
Коефіцієнт зсуву потужності	-	11			
DBF / cosφ	-	11			
Додаткова невизначеність в% діапазона <sup>1</sup>	B PN > 250 В	0,015%	0,0225%	0,0225%	0,015%

Кліщі Fluke 345 для вимірювання якості електроенергії рис.15.11.



Рисунок 15.11 - Кліщі Fluke 345

Прилад являє собою комбінацію аналізатора потужності, реєстратора якості електроенергії та струмовимірювальних кліщів і ідеально підходить для контролю електронних навантажень.

З яскравим кольоровим дисплеєм для аналізу спектру гармонік, фільтром низьких частот для придушення високочастотних шумів і конструкцією, що забезпечує високу стійкість перед перешкодами, аналізатор потужності Fluke 345 ідеально підходить для усунення несправностей в ланцюгах живлення комутованих навантажень. Крім того, наявність струмовимірювальних кліщів, які працюють на основі ефекту Холла, дозволяє вимірювати постійний струм за допомогою вимірювача потужності без обриву ланцюга. Вбудована пам'ять аналізатора потужності забезпечує реєстрацію даних щодо якості електроенергії протягом тривалих періодів часу, спрощуючи аналіз тенденцій і нерегулярних збоїв.

#### Застосування

Налагодження та усунення несправностей частотно-регульованих приводів і систем безперебійного живлення (UPS) – Перевірка правильного функціонування пристроїв шляхом вимірювання ключових параметрів якості електроенергії.


Вимірювання гармонік – Виявлення гармонійних спотворень, які можуть привести до пошкодження або порушення нормального режиму роботи важливих вузлів обладнання.

Реєстрація пускових струмів – Вимірювання пускових струмів, що призводять до помилкових скидів і спрацьовувань автоматичних вимикачів.

Навантажувальні випробування – Визначення можливостей електричної системи перед підключенням навантажень

#### Ключові особливості

Вимірювання змінного і постійного струму: Вимірювання справжніх середньоквадратичних значень змінного струму до 1400 А і постійного струму до 2000 А за допомогою струмовимірювальних кліщів без розриву кола.



Номинальна точність в середовищі з високим рівнем перешкод: Фільтр низьких частот дозволяє отримати точні результати за допомогою струмовимірювальних кліщів навіть при спотворенні форми сигналу на електронних навантаженнях

Реєстрація даних: Ідентифікація нерегулярних збоїв шляхом щохвилинної реєстрації будь-яких параметрів якості електроенергії, включаючи гармоніки, протягом місяця

Перевірка джерел постійного струму: Пряме вимірювання пульсацій (в%) на батареях і в системах постійного струму

Виявлення несправностей, пов'язаних з гармоніками: Аналіз і реєстрація гармонік в цифровій або графічній формі

Пусковий струм: Реєстрація та аналіз помилкових спрацьовувань пристроїв захисту для періодів від 3 до 300 секунд

Простота у використанні: Зручне налаштування аналізатора електропостачання за допомогою кольорового дисплея з підсвічуванням, що відображає осцилограми сигналів і графіки трендів

Вивчення 3-фазних систем: Вбудована функція для дослідження збалансованих навантажень

Побудова графіків і створення звітів: Можливість використання аналізатора електропостачання з програмою Power Log, що входить в комплект поставки

## **15.7 Осцилографи**

### **Електронні осцилографи**

Осцилограф (лат. *oscillo* - гойдаюся і *graph* - пишу) - контрольно-вимірювальний прилад для дослідження і візуалізації електричних сигналів, а також визначення їх параметрів в реальному часі. Осцилограф, дозволяє проводити візуальний контроль таких характеристик, як форма, період, амплітуда, полярність або тривалість сигналу.


Електронно-променеві (електронні) осцилографи призначені для:

- візуального спостереження,
- вимірювання,
- реєстрації електричних сигналів.

Можливість спостереження сигналів, що змінюються в часі, робить осцилографи унікальними приладами при дослідженні різних параметрів досліджуваних сигналів. Осцилографи можна вважати одними з найбільш поширених контрольно-вимірювальних приладів в багатьох технічних галузях виробництва і наукових досліджень.

Класифікація осцилографів можлива по декількох параметрах, наприклад:

1. за способом обробки вхідного сигналу, вони діляться на:
  - аналогові,
  - цифрові;
2. по частотному діапазону на:

- 
- низькочастотні,
  - універсальні (імпульсні),
  - високочастотні
3. по кількості променів на:
- однопроменеві,
  - двопроменеві і так далі.

N-променевий осцилограф має N сигнальних входів і може одночасно відображати на екрані N графіків.

Цифрові осцилографи у свою чергу діляться на:

- що запам'ятовують,
- люмінофорні,
- стробоскопічні.

Електронним осцилографом, називається електронний пристрій який дозволяє спостерігати на екрані графік зміни напруги, яка подається а його вертикально-відхиляючий вхід. Напруга яка подається на горизонтально - відхиляючий вхід розгортає по ширині. Оскільки в переважній більшості випадків, слід відстежити зміну вхідної напруги в часі, то напруга що розгортається, формується лінійним збільшенням в часі, тобто пилкоподібною формою.

Здібність візуалізувати сигнали є надзвичайно важливою якістю осцилографа, що дозволяє оперативно проводити контроль і діагностику електричних ланцюгів. Крім того, сучасні осцилографи дозволяють отримати графіки сигналів дуже точно з витриманим масштабом на осях координат, що дозволяє визначити в різні моменти часу період, частоту і зсув сигналу по фазі.

Таким чином, сучасний осцилограф, є універсальним вимірювальним приладом.


Останнім часом розроблені і використовуються різні види електронних осцилографів а саме: універсальні, швидкісні, запам'ятовуючі і спеціальні осцилографи.

Найбільш поширені універсальні осцилографи, що дозволяють досліджувати різноманітність електричних сигналів з тривалістю від одиниць наносекунд до декількох секунд в діапазоні від частки мили вольт до сотен вольт.

Смуга кращих універсальних осцилографів становить 300 400 МГц. Часто універсальні осцилографи виготовляються із змінними блоками, що дозволяє розширюючи їх функціональність.

Для дослідження процесів дуже швидкісних процесів (нано- та піко секундної тривалістю) призначені високошвидкісний осцилографи, в яких використовують спеціальні електронно-променева трубка з бігучою хвиллю.

Запам'ятовуючі осцилографи, мають спеціальні електронно-променеві трубки, які мають здатність зберігати та відтворювати зображення сигналу протягом тривалого часу після зникнення його на вході. Основне



призначення запам'ятовуючого осцилографу - дослідження разових і рідко повторюваних процесів.

Спеціальні осцилографи оснащені додаткові блоки цільового призначення.

До них відносяться цифрові осцилографи, які дозволяють не тільки спостерігати сигнал, але і передати його у цифровому виді до комп'ютера для подальшої обробки. Спеціальні осцилографи поставляється з блоками, вимірювання напруги, струму і опорів (мультиметрами), а також пристроями для досліджень вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів. За кількістю одночасно спостережуваних, на екрані сигналів відрізняють одно- і багатоканальні осцилографи. Суміщення на екрані зображення кількох вхідних сигналів реалізується за рахунок використання спеціальних багатопроменевих трубок, або через періодичне перемикання осцилографа на різні входи за допомогою електронного комутатора.

### **Цифрові осцилографи.**

Останнім часом цифрові осцилографи, які мають великий ряд переваг, витісняють аналогові прилади зі світового ринку, але все-таки традиційні аналогові осцилографи реального часу не зникають повністю, насамперед із-за низької вартості порівняно з цифровими осцилографами. Плюс до цього з розвитком елементної бази аналогові осцилографи придбали ряд важливих додаткових функцій і можливостей, наприклад, курсори з цифровим відліком величин (напруги і часу), що надзвичайно полегшують роботу, і дуже зручне цифрове управління. За допомогою вхідного мультіплексора для декількох каналів можна досить просто організувати єдину розгортку на однолучевой трубці з відображенням декількох сигналів.

Основна відмінність в тому, що досліджувані безперервні сигнали ще на вході осцилографа, за допомогою спеціальних аналого-цифрових перетворювачів перетворюються у цифрову форму, тобто представлені як послідовність числових кодів. Таким чином, завдяки подальшої обробки в самому осцилографі цієї цифрової інформації за допомогою мікропроцесорної техніки, можна отримати значення широкого спектру параметрів досліджуваного сигналу з високою точністю. І, як наслідок, на екрані осцилограф, можна відобразити не тільки сам процес дослідження і, водночас числові параметри, але, і його спектральний склад та автокореляційну функцію. Однак, треба відмітити, що швидко розвиваються в наш час так звані віртуальні пристрої створюють серйозну конкуренцію з ними.

В порівнянні з аналоговими попередниками вони мають ширші можливості, а завдяки зниженню вартості цифрових схем з кожним роком вони стають доступнішими потенційним покупцям. У загальному вигляді цифровий осцилограф складається з вхідного дільника, нормалізуючого підсилювача, аналого-цифрового перетворювача, блоку пам'яті, пристрою управління пристрою відображення. Пристрій відображення зазвичай виконується на основі рідкокристалічної панелі (рис.15.12).

Цифрові осцилографи мають більш широкі можливості за рахунок самого принципу роботи. Вхідний сигнал після нормалізації перетворюється в цифрову форму і записується в пам'ять. Швидкість запису (кількість вибірок у секунду) задається пристроєм управління, і її верхня межа визначається швидкодією аналого-цифрового перетворювача, а нижня межа теоретично не обмежена, на відміну від аналогових осцилографів. Повне оцифрування сигналу дозволяє уникнути відображення сигналу в реальному масштабі часу і, отже, підвищити стійкість зображення, організувати збереження результатів, спростити масштабування і розтяжку, ввести мітки. Використання дисплея замість осцилографічної трубки відкриває можливість для відображення будь-якої додаткової інформації і управління приладом за допомогою меню. Характеристики сучасних цифрових осцилографів:

- висока чутливість (від 1 мВ/дел) і дозвільна спроможність (від 8 до 14 біт);
- широкий діапазон коефіцієнтів розгортки (від 2 нс до 50 с);
- розтяжка сигналу за часом або по амплітуді в широких межах;
- розвинена логіка синхронізації з будь-якими затримками запуску розгортки.

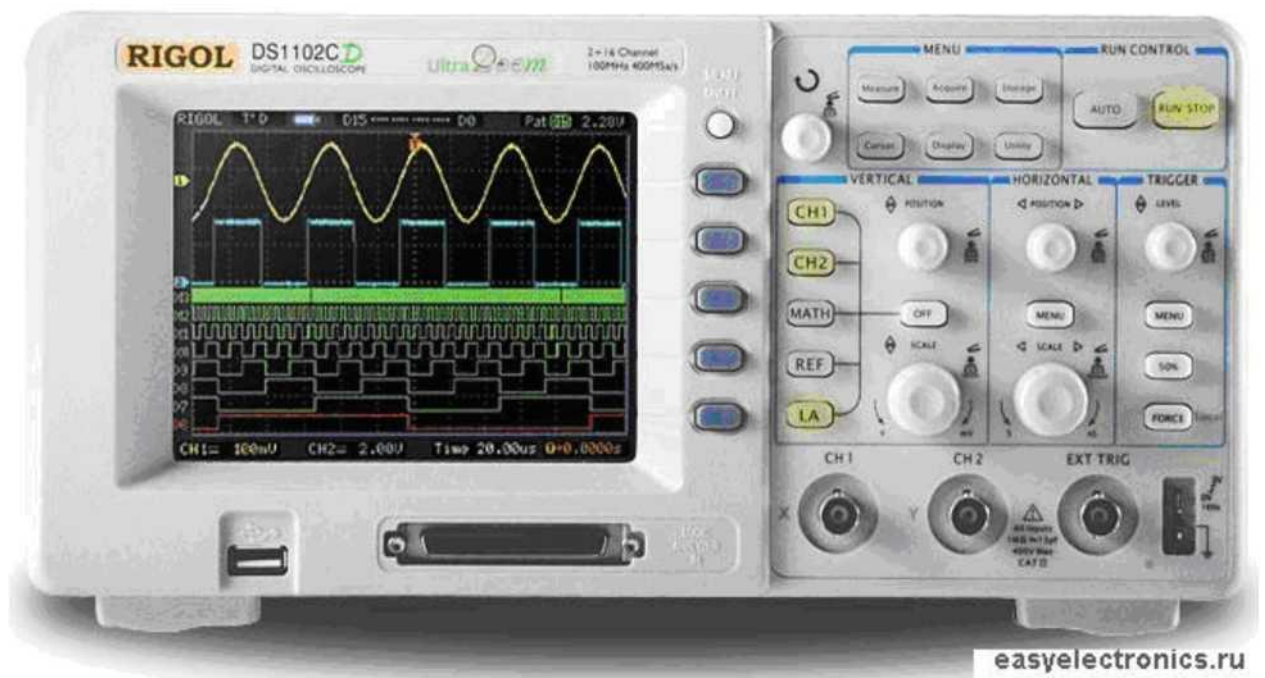



Рисунок 15.12 - Цифровий осцилограф

Окрім звичайних схем запуску синхронізації запуск може проводитися, наприклад, при настанні певної події або при його відсутності, а також при досягненні певного значення параметра сигналу.

Сигнал, по якому здійснюється синхронізація, і основний сигнал можна спостерігати у момент безпосередньо перед запуском розгортки.



Цифрові люмінофорні осцилографи. Цей клас цифрових осцилографів використовує нову архітектуру побудови, яка базується на технології «цифрового люмінофора». Ця технологія в цифровій формі імітує властиву аналоговим осцилографам реального часу зміну інтенсивності зображення. Іншими словами, цифрові люмінофорні осцилографи дозволяють розробникам бачити на екрані, наприклад, модульовані сигнали і всі їх тонкі деталі, як і аналогові осцилографи реального часу, забезпечуючи при цьому їх зберігання, вимірювання і аналіз, як цифрові осцилографи, що запам'ятовують.

Як і інші сучасні цифрові осцилографи, люмінофорні осцилографи мають пам'ять, в якій, зокрема, зберігаються значення різниці часів затримок між різними пробниками.

Цифрові стробоскопічні осцилографи. В цьому класі приладів використовується принцип послідовного стробування миттєвих значень сигналу для перетворення (стискування) його спектру; при кожному повторенні сигналу визначається (відбирається) миттєве значення сигналу в одній точці.


Стробоскопічні осцилографи найбільш широкосмугові (значення смуги пропускання може становить 100 ГГц) і дозволяють досліджувати періодичні сигнали з мінімальною тривалістю. Але слід зазначити, осцилографи цього класу є дуже дорогими, а тому використовуються, як правило, для вирішення складних технічних і виробничих проблем.

Завдяки вище викладеним перевагам цифрові осцилографи зайняли міцні позиції у виробництві контрольних - вимірювальних приладів і майже витіснили з ринку аналогові осцилографи. За даними компанії Frost & Sullivan, частка продажів цифрових осцилографів на світовому ринку в 2007 році складала 87,4% тоді як для аналогових приладів названа цифра 2,8%. На сьогоднішній день в світі існує немало фірм, які займаються розробкою цифрових осцилографів досить давно і пропонують хорошу, сертифіковану, багатофункціональну продукцію. Але із споживчої точки зору вагомим недоліком цих проділів є достатньо висока їх вартість.

## **15.8 Віртуальні вимірювальні прилади**

Бурхливий розвиток комп'ютерної техніки привів до впровадження її практично в усі галузі науки і техніки. Це не обійшло стороною і техніку вимірювання в широкому сенсі цього поняття.

Спочатку комп'ютери використовувалися як окрема апаратура для управління процесом вимірювань і обробки експериментальних даних з метою отримання результатів непрямих і агрегатних вимірювань, що вимагало досить складних і об'ємних обчислень. Потім стали практикувати відображення цих результатів на дисплеях персональних комп'ютерів, використовуючи їх в якості ваг або лічильних пристроїв вимірювальних приладів. Пізніше розвиток апаратних засобів і спеціального програмного за-




безпечення призвело до злиття цифрової вимірювальної техніки з комп'ютером до такої міри, що з'явилося нове поняття - віртуальний вимірювальний прилад.

Віртуальний вимірювальний прилад - це персональний комп'ютер або система, в найпростішому випадку зі спеціальною вбудованою платою збору даних, або, в разі більш складних багатофункціональних вимірювань, з додатковим блоком, підключеним до комп'ютера з'єднувальним кабелем. Плата або додатковий блок виконує функцію введення, перемикання, дискретизації, квантування і кодування сигналів, що надходять від керованих об'єктів. А функцію моделювання необхідної вимірювальної системи, обробки отриманих числових значень вхідних сигналів (тобто фактичних результатів вимірювання цих сигналів) за заданими алгоритмами, а також виведення результатів обробки на екран в потрібному вигляді визначається комп'ютером під управлінням спеціально розробленого програмного забезпечення. Особливістю віртуальних пристроїв є те, що всі ручки управління і структура змодельованої вимірювальної системи також виводяться на дисплей комп'ютера, а сам процес управління здійснюється чітко і зручно, за допомогою стандартної клавіатури або миші. Тому така віртуальна панель управління вимірювальним приладом, на відміну від пульта управління звичайної вимірювальної апаратури, може бути багаторазово перероблена для оптимального використання в конкретних умовах вимірювального експерименту, що проводиться. Використовуючи відповідну плату або блок збору даних, а також відповідне програмне забезпечення, експериментатор конструює вимірювальний прилад, оптимально пристосований для вирішення тієї чи іншої метрологічної задачі.

Таким чином, технологія віртуальних пристроїв спирається на сучасну комп'ютерну техніку в поєднанні з гнучким спеціальним програмним забезпеченням і модульним високопродуктивним обладнанням для створення потужних комп'ютерних вимірювальних систем.

Сучасні віртуальні вимірювальні прилади дозволяють вимірювати і аналізувати як локальні, так і віддалені величини і процеси з часом вимірювання в десятки наносекунд і похибкою в соті і тисячні частки відсотка. Їх можливості зараз зросли настільки, що навіть перевищують можливості традиційних пристроїв. У той же час вони дозволяють наочно виводити на екран дисплея значення вимірюваних величин, осцилограм різних процесів, їх амплітудно-частотні характеристики, як двовимірні, так і у вигляді тривимірних графічних зображень, спектральних густин і гістограм статистичних

Найвідомішою компанією, яка займається розробкою як апаратних модулів, так і програмного забезпечення, є National Instruments (NI). Розроблені нею апаратні модулі та спеціалізоване програмне забезпечення віртуальних приладів під загальною назвою LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) отримали широке застосування, з кожним роком удосконалюються і розширюються і охоплюють величезний



спектр можливостей як управління процесом вимірювання, так і методів обробки та відображення результатів вимірювань.

## **Висновки**

Цифрові вимірювальні прилади:

Цифрові прилади забезпечують автоматичне перетворення та обробку вимірювальної інформації, використовуючи аналого-цифрові перетворювачі. Мікропроцесорні технології дозволяють інтегрувати функції вимірювання, обробки, керування та відображення даних у єдиному пристрої.

Переваги цифрових приладів:

Висока точність та стабільність завдяки автоматизації процесу вимірювань. Можливість обробки великих масивів даних та їх передачі для аналізу. Універсальність використання для різних типів фізичних величин через відповідні перетворювачі.

Основні характеристики: Інструментальна похибка, похибка квантування, швидкодія, вхідний опір, апертурний час, динамічні властивості. Сучасні цифрові прилади мають високу завадостійкість і можуть працювати в складних умовах.

Вимірювання якості електричної енергії: Основні показники якості: відхилення напруги, частоти, коефіцієнти гармонік, несиметрія напруги. Міжнародні стандарти (ГОСТ, ДСТУ) регламентують параметри якості електроенергії для забезпечення надійності електропостачання.

Сучасні технології: Використання аналізаторів якості електроенергії та цифрових мультиметрів для оцінки параметрів електромереж і оптимізації енергоспоживання. Інтеграція із програмним забезпеченням для автоматичного збору, аналізу і генерації звітів.

Тенденції розвитку: Удосконалення мікропроцесорів для розширення можливостей приладів. Створення багатофункціональних вимірювальних пристроїв для комплексного контролю.

## **Контрольні запитання до теми 15**


1. Що таке цифрові вимірювальні прилади (ЦВП), і які їх основні характеристики?
2. Як працюють цифрові вольтметри та амперметри, і які принципи аналого-цифрового перетворення в них використовуються?
3. У чому полягають основні переваги цифрових вимірювальних приладів порівняно з аналоговими?
4. Що таке похибка квантування, і як вона впливає на точність вимірювань у ЦВП?
5. Як використання мікроконтролерів підвищує ефективність цифрових вимірювальних систем?
6. У чому полягає роль пристрою вибірки та зберігання у цифрових вимірювальних приладах?
7. Що таке цифровий частотомір і як визначається середнє значення частоти сигналу?



8. Як працює цифровий фазометр миттєвих значень, і які його основні компоненти?
9. У чому полягає принцип роботи цифрового вольтметра з часово-імпульсним перетворенням?
10. Як цифрові мультиметри забезпечують вимірювання різних фізичних і електричних величин?
11. Що таке "кондиціонування сигналу", і чому воно є важливим у цифрових вимірювальних системах?
12. Які функції виконують мікропроцесори у цифрових вимірювальних приладах?
13. Як цифрові вимірювальні прилади інтегруються у системи збору та обробки даних (SCADA)?
14. У чому полягає важливість вимірювання параметрів якості електричної енергії?
15. Які міжнародні стандарти регулюють якість електричної енергії?
16. Як вимірюються відхилення напруги, частоти і несиметрія напруг у мережах?
17. Що таке гармонійні спотворення, і як вони впливають на якість електричної енергії?
18. Як працюють трифазні аналізатори якості електроенергії, і які їх основні функції?
19. У чому полягають ключові особливості осцилографів як вимірювальних приладів?
20. Як вимірювання якості електричної енергії впливає на ефективність і безпеку роботи електричних систем?

### **Використана література до теми 15**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний по-сібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
3. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра га-лузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Житомир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
4. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параметрів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.

- 
5. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: навчально-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабіченка. Харків: Мірошніченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.
  9. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.
  10. Соколов С. В., Соколов О. С., Антоненко С. С. Контроль і вимірювання в технологічних та енергетичних системах: конспект лекцій. Суми: Сумський державний університет, 2020. 242 с.
  11. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
  12. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. [та ін.] Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. 496 с.
  13. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.
  14. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 521 с.
  15. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.



## ТЕМА 16. ОСНОВИ КАЛІБРУВАННЯ, ПОВІРКИ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

Поняття калібрування і його важливість. Основні методи калібрування. Використання еталонів під час калібрування. Оцінка точності приладів після калібрування. Інтервали калібрування і їх вибір. Документація і стандарти в процесі калібрування. Висновки.

### 16.1 Калібрування засобів вимірювальної техніки та устаткування

Перевірка та калібрування вимірювальної техніки: схожість та відмінність Технічною базою забезпечення єдності вимірювання є система відтворення одиниць фізичних величин і передачі інформації про їх розміри усім без виключення засобам вимірювальної техніки в країні.

Передача розмірів фізичних одиниць – це технічна операція, яка проводиться за допомогою перевірочних схем, шляхом перевірки або калібрування засобів вимірювання.

Перевірочна схема – це ухвалений в установленому порядку нормативний документ, що регламентує засоби, методи, точність, похибку передачі розмірів одиниць фізичної величини від державного еталону або початкового еталону робочим засобам вимірювання. Перевірочна схема може бути державною або локальною.


Державна перевірочна схема – поширюється на усі ЗВТ даної ФВ, наявні в країні. Розробляються метрологічними установами, що є головними центрами державних еталонів. Вони очолюються державними еталонами.

Локальна перевірочна схема – поширюється на ЗВТ даної ФВ, належній перевірці в окремому органі метрологічної служби (відомство, підприємство).

Розробляються метрологічною службою підприємства і до затвердження керівництвом підприємства узгоджується з територіальним органом Держспоживстандарту. Вона очолюється початковим еталоном.

Відомча перевірочна схема – поширюється на СІ цієї ФВ, що підлягають відомчій перевірці.

Перевірочні схеми оформляються у вигляді креслень, доповнюючи текстовою частиною, яка включає вступну частину і пояснення до елементів креслення. До нормативної документації, що регламентує вимоги до організації технічного забезпечення єдності вимірювання в області метрологічного забезпечення виробництва можна віднести ГОСТ 8.061-80 «ГСИ. Повірочні схеми. Зміст та будова» – правила розрахунку параметрів перевірочних схем, оформлення креслень перевірочних схем; ДСТУ 2708-2006 «Перевірка засобів вимірювальної техніки. Організація і порядок проведення»; ДСТУ 3989-2000 «Калібрування засобів вимірювальної техніки. Організація і порядок проведення».



Перевірка – встановлення придатності засобів вимірювальної техніки, на які поширюється Державний нагляд або контроль. В процесі перевірки здійснюється нагляд за одноманітністю ЗВТ, яка характеризується виконанням двох вимог: ЗВТ мають бути проградуйовані в узаконених одиницях, а їх метрологічні характеристики повинні відповідати нормам.

Перевірка здійснюється територіальними метрологічними службами, державні повірники ЗВТ. Можуть також проводити перевірку метрологічні служби підприємств, що отримали право на її проведення. ЗВТ, визнане придатним до застосування, оформлюється видачею свідоцтва про повірку і нанесенням повірочного клейма.

Калібрування – визначення метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, на які не поширюється Державний нагляд. Встановлення метрологічних характеристик ЗВТ в реальних умовах їх застосування. Калібрування підрозділяється на:

- первинне, якому піддаються усі ЗВТ, що виходять з виробництва або ремонту;
- періодичне, якому піддаються усі ЗВТ, що знаходяться в експлуатації, через встановлений власником міжповірочний інтервал;
- позачергове, якому піддаються ЗВТ, що викликали підозри до своїх метрологічних характеристик.

Міжповірочний інтервал встановлюється власником ЗВТ, що несе відповідальність за його робочий стан.

## **16.2 Мета і види метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки**

Засоби вимірювальної техніки є технічними засобами, які характеризуються нормованими метрологічними характеристиками. Надійність ЗВТ визначається їхньою здатністю зберігати метрологічні характеристики в регламентованих межах. Вихід за ці межі класифікується як метрологічна відмова.

Засоби вимірювальної техніки, що виготовляються або підлягають ремонту, ввозяться з-за кордону, знаходяться в експлуатації та на зберіганні, підлягають метрологічній повірці.


Метрологічна повірка ЗВТ (надалі - повірка) – це встановлення придатності ЗВТ до застосування на основі експериментального визначення його метрологічних характеристик і контролю їх відповідності встановленим нормам. Метрологічну перевірку ЗВТ здійснюють згідно з «Законом України про метрологію та метрологічну діяльність» та ДСТУ 2708-99 «Метрологія».

Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація і порядок проведення».

Повірку здійснюють органи державної і відомчої служби.

Обов'язковій державній повірці підлягають:

- ЗВТ, що використовуються в органах державної служби;



- ЗВТ, що випускаються з виробництва або використовуються на підприємствах як зразкові;

- ЗВТ, що застосовуються як робочі для вимірювань, результати яких використовуються для обліку матеріальних цінностей, палива, енергії, в торгівлі, для захисту довкілля та охорони праці;

- ЗВТ, що використовуються для вимірювань, результати яких є підставою для реєстрації національних та міжнародних спортивних рекордів.

Відомчій повірці підлягають ЗВТ, що не ввійшли у наведений вище перелік ЗВТ, які підлягають обов'язковій державній повірці. Відомчу повірку здійснюють підрозділи метрологічної служби підприємства. Конкретна номенклатура ЗВТ, що підлягають відомчій повірці, встановлюється відомчою метрологічною службою підприємства і територіальним органом

Держстандарту. Право на здійснення метрологічною службою підприємства повірки конкретних видів ЗВТ надається територіальному органу Держстандарту.

Відповідно до Державної системи забезпечення єдності вимірювань повірка може бути первинною, періодичною, позачерговою, інспекційною та експертною.

Первинна повірка виконується вперше після виготовлення ЗВТ або після ремонту, а також при імпорті ЗВТ партіями. Первинній повірці підлягає кожен зразок засобів вимірювальної техніки. Під час випуску з виробництва допускається проводити вибіркову первинну повірку засобів вимірювальної техніки, якщо це передбачено відповідним нормативним документом або методикою повірки. Позитивні результати вибіркової первинної повірки поширюються на всі засоби вимірювальної техніки з партії, яку подають на повірку.


Первинну повірку проводять на місці виготовлення (ремонт) засобів вимірювальної техніки, 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.

Первинну повірку засобів вимірювальної техніки проводять за договором або письмовим зверненням заявника, яке подають до організації, що проводить повірку, або керівнику КПП.

Періодична повірка виконується протягом експлуатації ЗВТ через встановлений проміжок часу.

Періодичній повірці підлягає кожен засіб вимірювальної техніки, за винятком тих, періодичну повірку яких не передбачено методикою повірки.



Засоби вимірювальної техніки, які зберігають та не використовують, можна не піддавати періодичній повірці. У цьому випадку засоби вимірювальної техніки треба піддавати позачерговій повірці безпосередньо до введення в експлуатацію, продажу або видавання напрокат.

Засоби вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, в тому числі ті, які 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 засобів вимірювальної техніки, що повіряють, погоджуючи це рішення з заявником.

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

Порядок подання фізичними особами, які не є суб'єктами підприємницької діяльності, — власниками засобів вимірювальної техніки, 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 Кабінет Міністрів України.

Тривалість перебування засобів вимірювальної техніки 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 засобів вимірювальної техніки, тривалість повірки яких згідно з методикою повірки перевищує цей термін).

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

Позачергова повірка ЗВТ здійснюється раніше терміну чергової періодичної повірки.

Позачергову повірку проводять в таких випадках:

- за потреби заявника пересвідчитись у придатності засобів вимірювальної техніки до застосування;
- у разі пошкодження відбитка повірочного тавра або втрати свідцтва про повірку;
- у разі застосування засобів вимірювальної техніки як комплектувальних, якщо час, що минув після останньої повірки, перевищує половину міжповірочного інтервалу;
- у випадку продажу (відправлення) споживачеві засобів вимірювальної техніки в тому разі, коли час, що минув після останньої повірки, перевищує половину міжповірочного інтервалу;
- під час уведення в експлуатацію засобів вимірювальної техніки, які пройшли первинну повірку (у разі потреби).

Інспекційна повірка ЗВТ виконується при здійсненні державного нагляду та відомчого контролю за станом і використанням ЗВТ органами метрологічних служб.

Інспекційну повірку засобів вимірювальної техніки 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.

Вибіркова повірка ЗВТ, що вибрані з партії ЗВТ встановленим чином, виконується за результатами, які визначають придатність усієї партії ЗВТ.

Поелементна повірка – це така повірка, під час якої метрологічні характеристики ЗВТ визначають за метрологічними характеристиками їх окремих частин.

Експертна повірка здійснюється при виникненні спірних питань щодо метрологічних характеристик, справності та придатності ЗВТ до застосування, а також правильності їх експлуатації. Таку повірку виконують органи державної метрологічної служби на основі письмових вимог (заяв) суду, прокуратори, поліції та підприємств.

### **16.3 Методи метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки**

Всі методи метрологічної повірки поділяються на дві групи:

- з використанням зразкового ЗВТ;
- без використання зразкового ЗВТ - автономна перевірка.

Існують п'ять основних різновидів методів повірки, в яких використовується зразковий ЗВТ:

- метод безпосереднього порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ;

- метод порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ за допомогою компаратора;
- метод прямого вимірювання ЗВТ, що повіряється, величини, що відтворюється зразковою мірою (однозначною або багатозначною);
- метод прямого вимірювання зразковим ЗВТ величини, що відтворюється мірою, що повіряється;
- метод непрямого вимірювання величини, що відтворюється ЗВТ, що повіряється.

Всі методи повірки мають свої особливості, тому то розглянемо їх більш детально:

- метод безпосереднього порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ є самим найпоширенішим з методів повірки, так як його застосовують в галузі електричних та магнітних вимірювань для повірки приладів прямого перетворення: амперметрів, вольтметрів, ватметрів, частотомірів, омметрів, та в галузі вимірювань механічних величин – для повірки манометрів та витратомірів.

Основою методу є одночасне вимірювання одного й того самого значення фізичної величини зразковим приладом та приладом, що повіряється. За результатами вимірювань порівнюють показання приладу, що повіряється, ХП, з показаннями зразкового приладу, ХЗР, та визначають похибку,  $\Delta$ , приладу, що повіряється.


Перевагами методу є простота реалізації та відсутність складного вимірювального обладнання, недоліком – практична неможливість автоматизації повірки;

- метод порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ за допомогою компаратора використовують при неможливості порівняння показів двох приладів. Наприклад, при порівнянні показів двох вольтметрів, один з яких використовується тільки у колах постійного струму, а другий тільки у колах змінного струму, або при порівнянні розмірів мір магнітних та електричних величин. У схемі повірки застосовується проміжний елемент компаратор, який дає змогу опосередковано порівнювати дві різнорідні або однорідні фізичні величини. Таке порівняння ЗВТ засноване на методі протиставлення або на методі заміщення.

Суть методу протиставлення ґрунтується на оцінюванні результату сумісної дії двох ЗВТ: зразкового та того, що повіряється, на два різні входи двоканального компаратора. Метод заміщення реалізований на порівнянні результатів їх почергової дії на один і той самий вхід компаратора;

- метод прямого вимірювання ЗВТ, що повіряється, величини, що відтворюється зразковою мірою.

Метод реалізований на зміні розміру міри до суміщення покажчика аналогового приладу, що повіряється, з позначкою шкали такого приладу, або до встановлення необхідного показу ХПОВ цифрового приладу, що повіряється, з подальшим визначенням абсолютної похибки,  $\Delta$ , як різниці між показом ЗВТ, що повіряється.



Реалізація такого методу повірки потребує наявності спеціальних зразкових мір, які б відтворювали ту фізичну величину, в одиницях якої проградуєований ЗВТ, що повіряється. Перевагами методу є висока продуктивність повірки, можливість автоматизації, та, як наслідок, це призвело до появи нового різновиду багатозначних мір – калібраторів напруги та струму;

- метод прямого вимірювання зразковим ЗВТ величини, що відтворюється мірою, що повіряється використовується для повірки мір фізичних величин невисокої точності. Значення похибки у такому разі визначається як різниця між номінальним значенням міри, що повіряється, і показом зразкового ЗВТ, який одержаний при прямому вимірюванні розміру цієї міри. Прикладами реалізації такого методу повірки є прямі вимірювання параметрів мір опору, ємності, індуктивності за допомогою мостів постійного та змінного струму, а мір ЕРС – за допомогою компенсаторів постійного струму або компараторів напруг;

- метод непрямих вимірювань величини, що відтворюється ЗВТ, що повіряється використовується у випадку, коли прямі вимірювання застосувати не є можливим або коли непрямі вимірювання є простішими, ніж прямі.

Автономна повірка – це повірка без застосування зразкових ЗВТ та яка виникла для особливо точних ЗВТ, які не можуть бути повірені ні одним з існуючих вище методів внаслідок відсутності ще точніших ЗВТ з відповідними границями вимірювань. Метод автономної повірки найчастіше реалізовується при повірці приладів порівняння. Суть методу – це порівняння величин, що відтворюється окремими елементами схем ЗВТ, що повіряється, з величиною, яка вибрана як базова і відтворюється в самому ЗВТ, що повіряється.

Перевагами автономної повірки є висока точність та оперативність роботи, а недоліками є висока трудомісткість робіт з повірки.

Розглянемо вимоги до зразкових ЗВТ. Вибір зразкових ЗВТ є важливим завданням при організації повірки. В залежності від специфіки, обсягу і змісту повірки для кожного конкретного типу ЗВТ вимоги до вибору зразкових ЗВТ формуються індивідуально, але існують спільні, характерні для всіх ЗВТ, вимоги до вибору ЗВТ, а саме:

- зразковий ЗВТ повинен бути інваріантним до умов вимірювань і властивостей досліджуваних об'єктів, тобто ні умови вимірювань, ні властивості об'єктів не повинні впливати на його метрологічні характеристики;

- зразковий ЗВТ повинен бути призначений для вимірювань тих самих фізичних величин чи параметрів вимірювальних сигналів, що й ЗВТ, що повіряється, або тих величин, які передбачені методом повірки;

- діапазон вимірювань зразкового ЗВТ або діапазон зміни значень зразкової міри повинні бути більшими, ніж діапазон вимірювань ЗВТ, що повіряється

## 16.4 Метрологічна повірка приладів прямого перетворення

Прилад прямого перетворення - це вимірювальний прилад, в якому передбачено одне або декілька перетворень вимірювального сигналу без застосування зворотного зв'язку. Прилади цього типу становлять основну масу електровимірювальних приладів. До них належать амперметри, вольтметри, ватметри, омметри, фарадоміри, фазометри, лічильники енергії та комбіновані прилади.

Під час повірки виконуються такі операції:

- зовнішній огляд приладу;
- перевірка працездатності приладу;
- визначення впливу нахилу на покази приладу;
- перевірка електричної міцності ізоляції і визначення опору ізоляції;
- визначення основної похибки та варіації показів;
- встановлення величини «неповернення» покажчика на нульову позначку шкали;
- визначення часу заспокоєння рухомої частини приладу;
- розрахунок похибки спрацювання контактної пристрою;
- визначення похибки реєстрації показів.

На підготовчому етапі повірки приладів необхідно вибрати метод повірки, схему повірки та зразкові засоби вимірювальної техніки. ДСТУ2708-99 є основним нормативно-технічним документом, що регламентує вимоги до метрологічної повірки амперметрів, вольтметрів, ватметрів і варметрів. Для повірки приладів на постійному струмі застосовуються такі методи повірки:

- метод прямих вимірювань за допомогою калібратору струму для амперметрів класів точності 0,1...0,5;
- метод безпосереднього порівняння із зразковими амперметрами для амперметрів класів точності 1,0...5,0;
- метод прямих вимірювань за допомогою цифрового вольтметра для вольт-метрів класів точності 0,1...0,5;
- метод безпосереднього порівняння із зразковими вольтметрами для вольт-метрів класів точності 1,0...5,0;
- метод непрямих (опосередкованих) вимірювань за допомогою компенсаційної установки для ватметрів класів точності 0,1...0,5;
- метод безпосереднього порівняння із зразковими ватметрами для ватметрів класів точності 1,0...5,0.

Для повірки приладів на змінному струмі застосовуються такі методи повірки:

- метод порівняння за допомогою компаратора для амперметрів класів точності 0,1...0,2;
- метод безпосереднього порівняння із зразковими амперметрами та метод порівняння за допомогою компаратора для амперметрів класів точності 0,5...5,0;

- метод безпосереднього порівняння із зразковими вольтметрами та метод порівняння із зразковими вольтметрами для вольтметрів класів точності 1,0... 5,0;
- метод порівняння за допомогою компаратора для ватметрів класів точності 0,1.0,2;
- метод безпосереднього порівняння із зразковими ватметрами і варметрами та метод порівняння за допомогою компаратора для ватметрів та варметрів класів точності 0,5...5,0.

При виборі зразкових ЗВТ для перевірки приладів прямого перетворення основними задачами є визначення необхідного класу точності зразкового приладу і вибір його системи та границь вимірювання.

Співвідношення між основними похибками зразкових приладів та приладів, що повіряється, повинно бути не більш, ніж 1:3 при повірці приладів класів точності 0,05...0,5 і не більш, ніж 1:4 - для приладів класів точності 1,0. ..5,0. Варіація показань зразкового приладу не повинна перевищувати половини абсолютного значення границі його допустимої основної похибки. Допускається співвідношення приймати такими, що дорівнюють 1:2,5, але до показань зразкових приладів необхідно вводити поправки.

При виборі системи зразкового приладу керуються такими вимогами:


- повірка здійснюється на тому роді струму, для якого вони призначені;
- зразковий прилад повинен бути призначений для вимірювання тієї ж самої фізичної величини, що й прилад, що повіряється;
- діапазони вимірювань і частот зразкових приладів повинні включати відповідні діапазони приладу, що повіряється;
- при повірці приладу на змінному струмі слід обирати такий зразковий прилад, який реагує на зміну кривої сигналу так само, як і прилад, що повіряється.

## **Висновки**

Калібрування та повірка – основи забезпечення точності вимірювань: Калібрування використовується для встановлення метрологічних характеристик приладів, на які не поширюється державний метрологічний нагляд. Повірка передбачає перевірку придатності приладів для забезпечення єдності вимірювань згідно з державними стандартами.

Види калібрування та повірки: Калібрування поділяється на первинне, періодичне та позачергове, залежно від умов і цілей використання приладів. Повірка може бути первинною, періодичною, позачерговою, інспекційною, вибірковою, поелементною або експертною.

Методи калібрування та повірки: Методи калібрування включають прямі вимірювання, порівняння з еталонними приладами та компараторами. Повірка може проводитись як із використанням зразкових засобів вимірювання, так і автономно для високоточних приладів.



Роль еталонів: Еталони є основою для передачі розмірів одиниць фізичних величин до робочих приладів. Використання зразкових засобів вимірювання дозволяє гарантувати точність і достовірність повірки.


Нормативна документація та стандарти: Процеси калібрування та повірки регламентуються державними стандартами (ДСТУ, ГОСТ), які визначають методи, вимоги та порядок проведення цих операцій.

Значення для промисловості та науки: Регулярне калібрування та повірка забезпечують якість вимірювань, що є критичним для виробничих процесів, наукових досліджень та торгівлі.

Сучасні тенденції: Удосконалення методів автоматизації калібрування та повірки дозволяє знизити похибки і підвищити ефективність роботи метрологічних служб.

### **Контрольні запитання до теми 16**

1. Що таке калібрування і які його основні завдання?
2. У чому різниця між калібруванням і повіркою засобів вимірювальної техніки (ЗВТ)?
3. Які основні етапи процесу калібрування засобів вимірювання?
4. Що таке державна перевірна схема, і як вона використовується для забезпечення точності вимірювань?
5. Як визначається міжповірочний інтервал, і хто відповідає за його встановлення?
6. Які види калібрування існують, і для яких випадків вони застосовуються?
7. Які нормативні документи регламентують проведення калібрування і повірки?
8. У чому полягає відмінність первинної, періодичної, позачергової і вибіркової повірок?
9. Що таке метрологічна відмова, і як вона впливає на надійність ЗВТ?
10. Які вимоги до оформлення документів після проведення калібрування або повірки?
11. Як здійснюється інспекційна повірка ЗВТ і в яких випадках вона застосовується?
12. Що таке автономна повірка, і які її основні переваги та недоліки?
13. Які методи повірки засобів вимірювання використовуються і як вони поділяються?
14. Як виконується повірка ЗВТ за методом безпосереднього порівняння зразкового приладу?
15. У чому суть методу порівняння за допомогою компаратора, і для яких випадків він призначений?
16. Що таке метод прямого вимірювання, і як він використовується у метрологічній практиці?


- 
17. Які особливості має повірка приладів прямого перетворення, наприклад, амперметрів чи вольтметрів?
  18. Як вибір зразкового ЗВТ впливає на точність результатів повірки?
  19. У яких випадках проводиться експертна повірка і хто її ініціює?
  20. Як правильно обирати зразкові ЗВТ для повірки електровимірювальних приладів?
  21. Ці питання охоплюють ключові аспекти калібрування, повірки і метрологічного забезпечення вимірювань.

### **Використана література до теми 16**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний по-сібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
3. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра га-лузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та при-ладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Жи-томир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
4. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання па-раме-трів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
5. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: на-вчаль-но-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабі-ченка. Харків: Мірошніченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.
6. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, ме-трологія та управління якістю: навчальний посібник / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.
7. Янчук І. В., Галунка О. Д., Сумарюк О. В. Метрологія і стандар-тиза-ція: конспект лекцій / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чер-нівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2021. 103 с.
8. Макота О. І., Олійник Л. П., Комаренська З. М. Метрологія, ста-нда-ртизація, сертифікація та акредитація: навчальний посібник / Нац. ун-т "Львів. політехніка". Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2019. 171 с. ISBN 978-966-941-354-3.
9. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: під-руч-ник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.



10. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. [та ін.] Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. 496 с.
11. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.
12. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.



## **ТЕМА 17. МЕТРОЛОГІЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИМІРЮВАНЬ. ВИМІРЮВАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, ДАТЧИКИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧІ. ДАТЧИКИ ТА ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН**

Структура систем автоматизованих вимірювань. Основні вимоги до автоматизованих вимірювальних систем. Датчики електричних і неелектричних величин. Принципи роботи перетворювачів. Забезпечення точності вимірювань в автоматизованих системах. Стандартизація та сертифікація вимірювальних інформаційних систем.

### **17.1 Вимірювальні перетворювачі на електричних величин**

На виробництві вимірюють значну кількість неелектричних фізичних величин. Кількість їх значно перевищує вимірювані електричні величини, а кількість місць на кожному енергоблоці, де роблять такі вимірювання, перевищує сотні.

Серед механічних величин, що підлягають вимірюванням величини: мас, зусиль обертових моментів, рівнів заповнення ємностей з водою, хімічними реактивами, мазутом, вугільним пилом, амплітуд і частот вібрацій, частот обертання, витрат води, пари тощо.

Особливу увагу приділяють вимірюванням теплових величин: температур обмоток електричних машин і трансформаторів, води, пари, повітря тощо.

Контролюють величини, що визначають властивості і склад речовин: хімічний склад газових сумішей, концентрацію розчинів, солоність води, вологість повітря, мазуту, вугілля та ін.

Для вимірювання вказаних величин використовують вимірювальні перетворювачі (датчики), що перетворюють вимірювані фізичні величини на електричні.

Вимірювальні перетворювачі механічних величин зі змінними активними опорами.

До цієї групи відносять реостатні перетворювачі переміщень і тензорезистивні перетворювачі.

Реостатні перетворювачі (датчики) переміщень виконують на основі намотаних дротом високого питомого опору резисторів з повзунком, що пересувається під дією об'єкта, розмір переміщення котрого необхідно вимірювати.

Для контролю величини поступальних переміщень, або обмежених кутових переміщень застосовують прямолінійні реостати, а для контролю величини значних кутових переміщень — дугові чи кутові. Дві можливі конструкції реостатів показано на рис. 17.1, а, б.

У цих перетворювачах величина опору чи напруги між нерухомим і рухомим контактами є залежною від величини переміщення рухомого контакту відносно нерухомого.

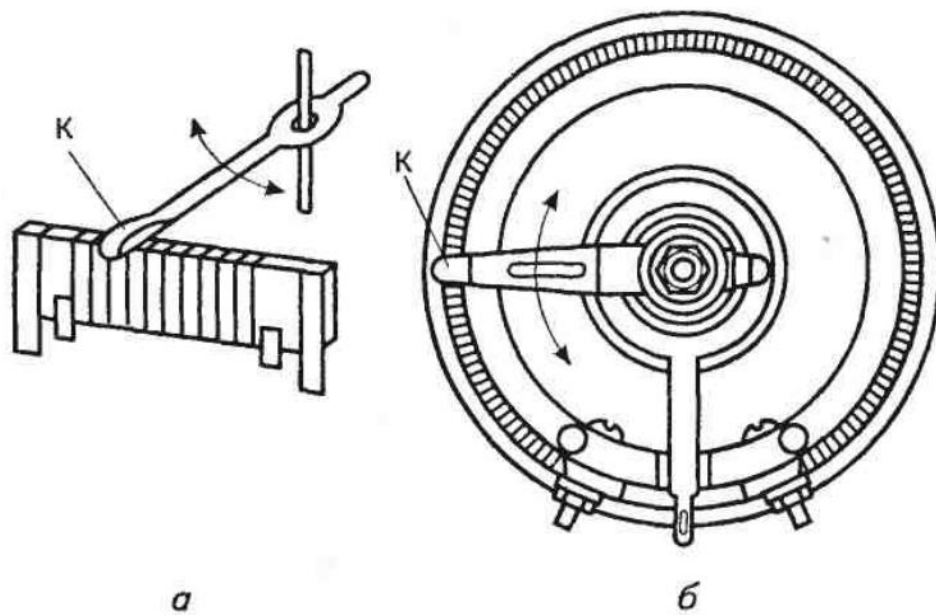


Рисунок 17.1 - Реостатні перетворювачі: а – прямолінійний; б – коловий

Для визначення величини сили, що діє на будь-яку конструкцію, найпростішим перетворювачем може бути дріт, що розтягується разом з конструкцією, до якої його прикріплено, та змінює величину свого електричного опору. Такий перетворювач зображено на рис. і 17.2. Він складається з паперової чи плівкової полімерної підкладки 1, на яку наклеєно дріт 3 матеріалу, чутливого до розтягування й здатного змінювати при цьому свій опір. До кінців цього дроту зварюванням чи паянням прикріплено мідні проводи, що з'єднують перетворювач з вимірювальною схемою. Поверх перетворювача наклеєно захисний шар паперу. Такі перетворювачі називають тензометрами.

Дротяні тензометри наклеюють на чисту поверхню випробуваної конструкції 2 за допомогою клею. Мідні проводи, що виходять з тензометра, приєднують до мостової або потенціометричної схеми, що вимірює опір. Про величину сили, що діє на випробувану конструкцію, роблять висновок за величиною зміни опору при розтягуванні тензометра разом з конструкцією.

Тензометри виготовляють з тонкого (діаметр 0,02... ..0,05 мм) константанового, копелевого, ніхромового чи нікелевого дроту, укладеного у 2...40 рядів. Довжина цих рядів під 5 до 25 мм, хоча інколи може досягти й 100 мм. Ширина тензометра 1... 10 мм.

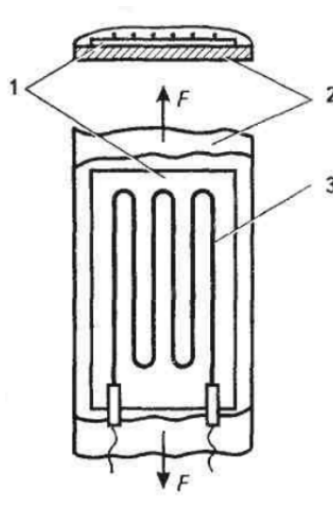


Рисунок 17.2 - Тензорезистивний перетворювач

### Індуктивні вимірювальні перетворювачі

В індуктивному перетворювачі при взаємному переміщенні його частин змінюється опір магнітного кола, а разом з ним і величина індуктивності обмотки цього перетворювача. Чим більшим буде магнітний опір, тим меншою стане величина індуктивності обмотки, а відтак, і її реактивний опір.

Два різновиди індуктивних перетворювачів показано на рис. 17.3. Перетворювач, що є на рис. 17.3, а, можна застосовувати для вимірювання відносно малих переміщень — від сотих часток міліметра до 5... 10 мм. Перетворювач, зображений на рис. 17.3, б, здатний вимірювати величини переміщення його рухомої частини 2 до 100...120 мм: Якщо відстань  $l$  у обох перетворювачів зменшується, то зменшується величина магнітного опору їхніх магнітних систем і збільшується величина індуктивності обмоток 3 цих перетворювачів. Якщо обмотки 3 через прилад, що вимірює струм, приєднати до джерела змінного струму з відомою і незмінною величиною напруги, то за величиною струму, яку показує прилад, можна мати уявлення про величину  $l$ , що є між рухомими частинами перетворювачів і кінцевим їхнім положенням. На рис. 17.3, в показано (орієнтовно) залежність між величиною струму котушок перетворювачів від відстаней  $l$ . При значних величинах  $l$ , де величина індуктивності котушок найменша, бо визначається лише величинами магнітних опорів розсіювання магнітних потоків у повітрі, переміщення рухомих частин перетворювачів (якорів) майже не впливає на величини струмів котушок. Звичайно, для перетворювачів такі відстані слід визнати неробочими.

Подібні перетворювачі працюють на частотах 50 Гц (найчастіше), і при підвищених частотах — 400...1000 Гц. При підвищених частотах індуктивні перетворювачі бувають меншими за розмірами ніж ті, що працюють на частоті 50 Гц.

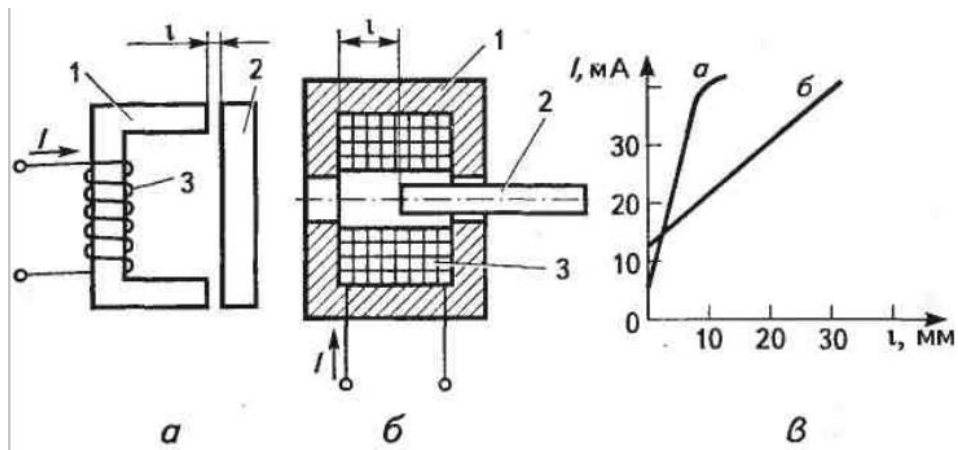


Рисунок 17.3 – Індуктивний перетворювач

Індукційні перетворювачі працюють завдяки наявності магнітної індукції. Індукційні перетворювачі, що створюють електричні сигнали, пропорційні швидкостям поступального і обертового руху, показано на рис. 17.4. У обмотках 1 цих перетворювачів, при їх русі у магнітному полі, створюваному постійними магнітами 2, виникають ЕРС, пропорційні швидкостям руху цих обмоток (точніше — пропорційні швидкостям, з якими витки цих обмоток перегинають силові лінії" магнітних полів).

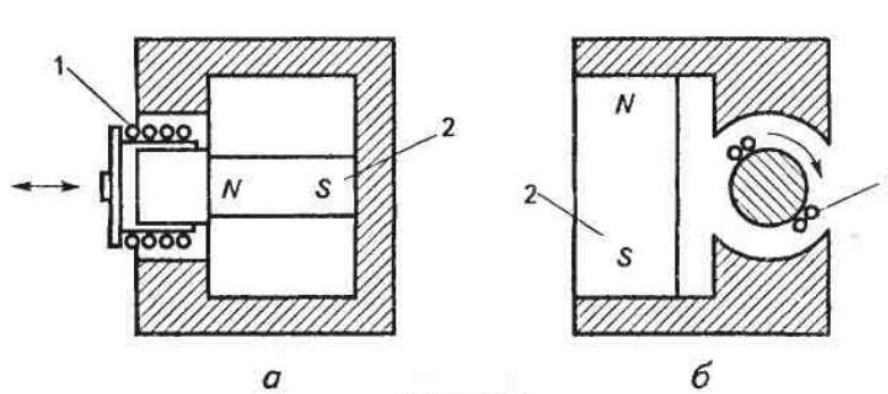


Рисунок 17.4 - Індукційний перетворювач для вимірювання вібрації (а) швидкості (б)

Перетворювач, зображений на рис. 17.4, а, придатний лише для контролю швидкості зворотно-поступального руху, наприклад, для вимірювань швидкостей вібрації. Щодо перетворювача, зображеного на рис. 17.4, б, то він придатний для вироблення сигналу й при безперервному обертанні обмотки 1 у магнітному полі. Тільки у цьому разі ЕРС, що виникає в обмотці, на кожному її оберті двічі змінюватиме знак, тобто обмотка вироблятиме ЕРС змінного струму. На основі такого перетворювача виконують перетворювачі швидкості обертання у пропорційну їй ЕРС змінного струму, якщо ЕРС з кінців обмотки знімати щітками з контактних кілець; чи постійного струму, якщо зняття ЕРС з обмотки виконують за допомогою

колектору. Подібні перетворювачі (рис. 17.4, б) називають тахогенераторами. їх широко застосовують для вимірювання швидкості обертання в усіх галузях техніки.

### Взаємоіндуктивні вимірювальні перетворювачі

Взаємоіндуктивні перетворювачі — це трансформаторні перетворювачі. Вони завжди мають хоча б дві обмотки (рис. 17.5, а, б): первинну 1 (намагнічувальну, приєднану до джерела живлення змінного струму з постійною за величиною напругою) і вторинну — вимірювальну 2, яку належить приєднати до електровимірювального приладу, що вимірює напругу (до вольтметра чи до схеми, що вимірює величину напруги змінного струму).

Перетворювач для вимірювання переміщень значної величини (порядку 1 м) зображено на рис. 17.5, а. Під кожним вимірювальною обмоткою перетворювача від вимірюваної величини (тобто відстані чи кута повороту). Напруги позначено у їхніх ефективних значеннях.

ЕРС  $E_2$ , яку дає вимірювальна обмотка 2 і яка залежить від величини змінного магнітного потоку, що є у нерухомому осердді 3 у місці знаходження цієї обмотки, буде тим меншою, чим далі ця обмотка розташована від обмотки збудження 1, бо щільність силових ліній магнітного поля (магнітна індукція) буде більшою саме поблизу обмотки 1, як видно з рис. 17.5, а. Зауважимо, що ЕРС  $E_2$  змінює фазу на  $180^\circ$  (рис. 17.5, б), тому вимірювання ЕРС дійсно дає результат, показаний на графіку, де тільки з виміряної величини  $E_2$  неможливо відрізнити, скажімо, кут повороту на  $90^\circ$  від кута повороту на  $270^\circ$ .

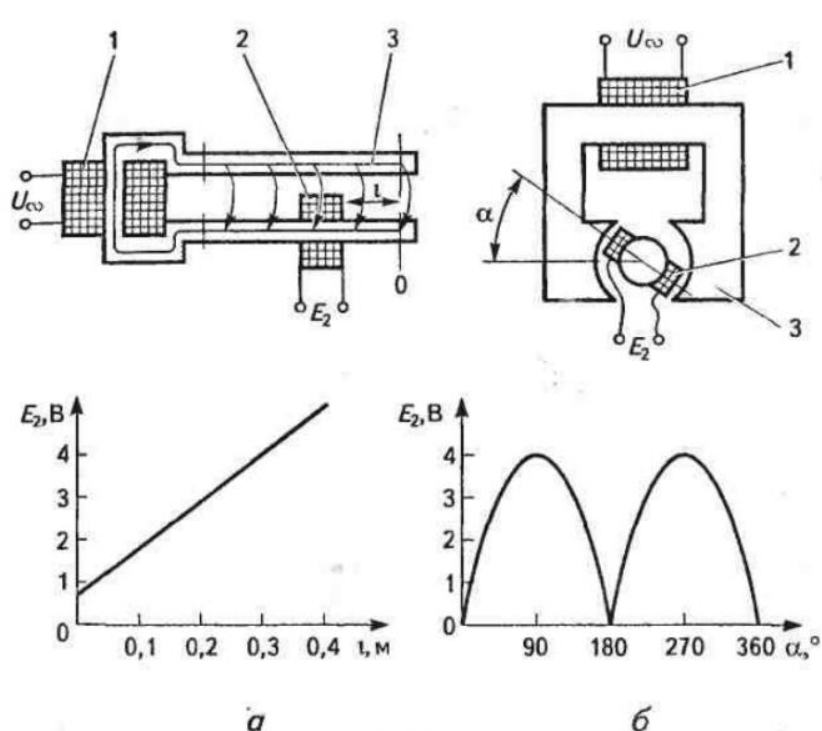


Рисунок 17.5 - Взаємоіндуктивні перетворювачі

Розрізнити ці кути повороту можна, використовуючи фазочутливі схеми, за допомогою котрих можна, користуючись вольтметром постійного струму з нулем посередині шкали, одержати при  $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$  позитивні показання вольтметра, а при кутах  $\alpha = 180^\circ \dots 360^\circ$  — негативні.

На відміну від попередньо розглянутих індукційних перетворювачів, де ЕРС  $E_2$  настає лише від руху обмоток, у взаємоіндуктивних перетворювачів ЕРС вимірювальних обмоток існує і при їх нерухомому стані.

Тобто за допомогою таких перетворювачів можна чітко визначити положення як рухомих, так і нерухомих частин і вузлів виробничих механізмів.

### Ємнісні вимірювальні перетворювачі

Ємнісні перетворювачі — це конденсатори, величина ємності котрих залежить від вимірюваної неелектричної величини. Ємнісні перетворювачі використовують для вимірювань невеликих переміщень, визначення складу рідких сумішей, рівня заповнення виробничих ємностей рідкими чи сипучими речовинами.

Ряд ємнісних перетворювачів показано на рис. 17.6. Плоский конденсатор може бути використаний для вимірювань невеликих переміщень (рис. 17.6, а), коли змінюється відстань  $l$  між його пластинами. Величина ємності  $C$  такого конденсатора, якщо він знаходиться у повітрі,

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{l},$$

де  $\varepsilon_0$  — діелектрична постійна ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);

$S$  - площа кожної пластини, м<sup>2</sup>;

$l$  - відстань між пластинами, м.

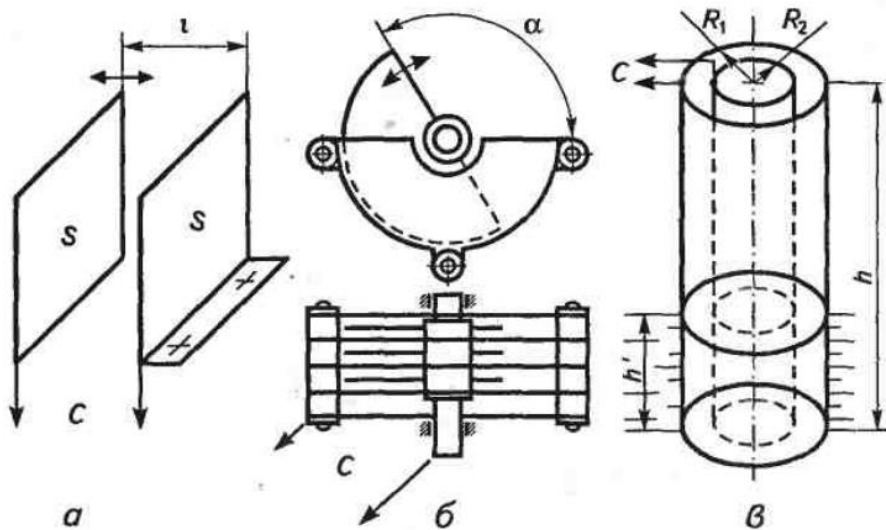


Рисунок 17.6 – Ємнісні перетворювачі

При величині площі кожної пластини  $10\text{см}^2$  ( $10^{-3}\text{м}^2$ ) і відстані між пластинами  $1\text{ мм}$  ( $10^{-3}\text{м}$ ) величина ємності конденсатора буде всього  $8,85 \cdot 10^{-12}\text{ Ф}$ , тобто  $8,85\text{ пФ}$ . А якщо відстань між пластинами збільшити до  $10\text{ мм}$ , то ємність стане меншою за  $1\text{ пФ}$ . Такі малі ємності сумірні з ємністю проводів та з ємністю між пластинами і близько розташованими частинами механізму, величини переміщень якого вимірюють. Все це знижуватиме точність вимірювань ємності такого конденсатора, а значить і точність визначення відстані  $l$ . Тому перетворювачі величин відстаней чи переміщень на основі плоских конденсаторів майже не використовують.

В той самий час багатопластинчастий конденсатор (рис. 17.6, б), за допомогою якого можна визначити величину кута повороту, що змінює ємність за рахунок зміни площі взаємодії пластин конденсатора (такі конденсатори до недавнього часу використовували майже в усіх радіо-приймачах, їхня найбільша ємність десь близько  $500\text{ пФ}$ ), можна беззаперечно використати як перетворювач кута повороту в електричну ємність.

У циліндричного конденсатора (рис. 17.6, в) величина ємності визначається виразом

$$C = \frac{2\pi h' \varepsilon}{\ln \frac{R_1}{R_2}} + \frac{2\pi(h - h') \varepsilon_0}{\ln \frac{R_1}{R_2}},$$

де  $h$  — довжина конденсатора, м;

$h'$  — висота рівня речовини, що знаходиться між циліндричними електродами, м;

$\varepsilon$  — абсолютна діелектрична проникність речовини, що знаходиться у проміжку між циліндричними електродами, Ф/м;

$R_1$ , — внутрішній радіус зовнішнього електрода, м;

$R_2$  — зовнішній радіус внутрішнього електрода, м.

Він може мати достатню ємність при значній його довжині та за суттєво більшої, ніж у повітря, діелектричної проникності  $\varepsilon$ . Найчастіше такий перетворювач використовують у ємнісних рівнемірах, які вимірюють рівні рідких не- електропровідних речовин (наприклад, бензину у високих ємностях).

Якщо речовина, що залита у технологічну ємність, не діелектрик, а провідник, як, наприклад, розчини кислот і солей, то вимірювальний конденсатор перетворювача висоти рівня у величину електричної ємності можна виконувати у вигляді одного електрода, ізольованого шаром матеріалу зі значною діелектричною проникністю, наприклад деякими полімерними матеріалами. У цьому разі другим (заземленим) електродом конденсатора буде сама електропровідна речовина, що облягає ізоляцію стрижня, який є першим електродом такого конденсатора.

## Теплові вимірювальні перетворювачі

Теплові вимірювальні перетворювачі, що серед вимірювальних перетворювачів чи не найчастіше застосовуються на теплових електростанціях та теплоелектроцентралях, поширені й на підприємствах усіх галузей промисловості, де у технологічному процесі використовують тепло.

У багатьох точках технологічного процесу вимірюють температури за допомогою термоелектричних чи терморезистивних перетворювачів. Термоелектричні перетворювачі — це в основному термопари, а терморезистивні — це термометри опору.

Термопари є генеруючими перетворювачами. Кожна з них складається з двох різнорідних проводів, з'єднаних у одному з кінців зварюванням чи лютуванням.

У термопар термоелектрорушійна сила виникає за наявності різниці температур місць з'єднання цих різнорідних провідників, перше з яких розташоване у місці вимірювання температури (де знаходиться саме місце зварювання), а друге — у місці приєднання цих провідників до електровимірювальних приладів, що вимірюють термо-ЕРС.

Для вимірювань різних величин температур використовують і різні термопари. Так, для температур нагріву не вищих за 600 °С користуються мідноконстантановими термопарами, для температур до 1600 °С — платинородій-платиновими, до 2500 °С — вольфраморенієвими. Тут вказані найбільш допустимі для вказаних термопар температури короточасного нагріву. Якщо ж термопару використовують протягом тривалого часу, то допустима температура повинна бути дещо меншою (на декілька сотень градусів).

Відносно величини створюваних термопарами термо-ЕРС, то з названих термопар найбільшу має хромель-копелева термопара (66,4 мВ при 800 °С), а найменшу — платинородій-платинова (16,76 мВ при 1600 °С).

Наведені величини термо-ЕРС передбачають, що кінці термопар, приєднані до вимірювальних приладів, перебувають при температурі 0 °С. У реальних умовах експлуатації приладів, коли температура навколо них буде близько 20 °С, справжні значення термо-ЕРС будуть дещо меншими.

Для кожного типу термопари передбачена своя залежність величини термо-ЕРС від величини температури між кінцями термопари. Ці залежності наведено у Державному стандарті на термопари, де вони дещо відрізняються від прямих.

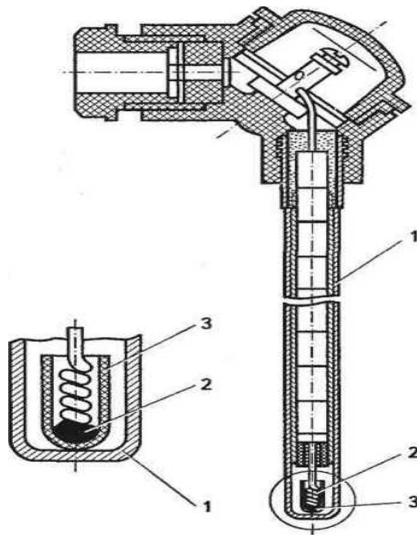


Рисунок 17.7 - Термопара з арматурою

Тому мілівольтметри, якими вимірюють ЕРС термопар, градуують у одиницях температури, беручи до уваги наявність такого відхилення для термопар кожного типу. Якщо ж ці ЕРС вимірюють переносними мілівольтметрами, градуйованими у мілівольтах, то для точного вимірювання температури термопарою необхідно користуватись таблицями, де наведено залежність ЕРС кожного типу термопар від температури.

Кожну термопару вміщено в арматуру, що захищає її від зовнішніх чинників та фіксує постійне місце її встановлення. У більшості випадків (рис. 17.7) арматуру 1 виготовлено з металу, до температури 400 °С — з міді чи латуні, до 700...800 °С — зі сталі, а для температур, більших ніж 1000... 1200 °С, — з порцеляни чи кварцу. Місце зварювання проводів термопари 2 ізолюється від денця металевої захисної трубки керамічним наконечником 3. Проводи термопари, що виходять з арматури, приєднані до контактів, закріплених у з'єднувальній коробці арматури. Всередині арматури проводи термопари ізолювано один від одного керамічними трубками чи бусами, а простір між ізолюваними проводами і стінкою арматури засипано керамічним порошком.

Через штуцер, вставлений під прямим кутом до арматури, проходять проводи від вимірювальних приладів, що приєднуються до проводів термопари через затискачі, встановлені у з'єднувальній коробці арматури.

Якщо термопара працює при особливо високих температурах, арматура може охолоджуватись на більшій частині своєї довжини пристроєм вода ного охолодження, виконаним у вигляді металевої трубки з двошаровою стінкою, у щілині, між шарами якої циркулює охолоджувальна вода, що надходить до цього проміжку та виходить з нього через штуцери, встановлені у верхній частині охолоджувального пристрою.

Терморезистивні перетворювачі (термометри електричного опору) — це вимірювальні перетворювачі, де використовується здатність провідників (іноді — напівпровідників) змінювати свій питомий опір під впливом температури, що є навколо них.

Найпоширенішими є перетворювачі, виготовлені з мідного чи платинового проводу. Мідні перетворювачі виконують для роботи при температурах від  $-50$  до  $180$  °С, платинові ж розраховано на більший діапазон вимірюваних температур, а саме: від  $-200$  до  $1100$  °С.

Терморезистивні перетворювачі можуть бути зроблені й зі сталюого або нікелевого проводу, але таке буває рідко.

Терморезистори виконані з мідного ізолюваного проводу, закладені у мідну трубку, заповнену керамічним піском.

Платинові терморезистори виконані у вигляді тонких спіралей, закладених у поздовжні канавки керамічного каркаса. Як і у мідних перетворювачах, порожні місця тут засипано порошком оксиду алюмінію, бо очікувані температури тут більші, ніж у мідних, і оксид алюмінію буде більш доцільним.

Ці терморезистори закладають у металеві (з нержавіючої сталі) трубки, які захищають їх від механічних пошкоджень.

Загальний вигляд складеного терморезистора зображено на рис. 17.8.

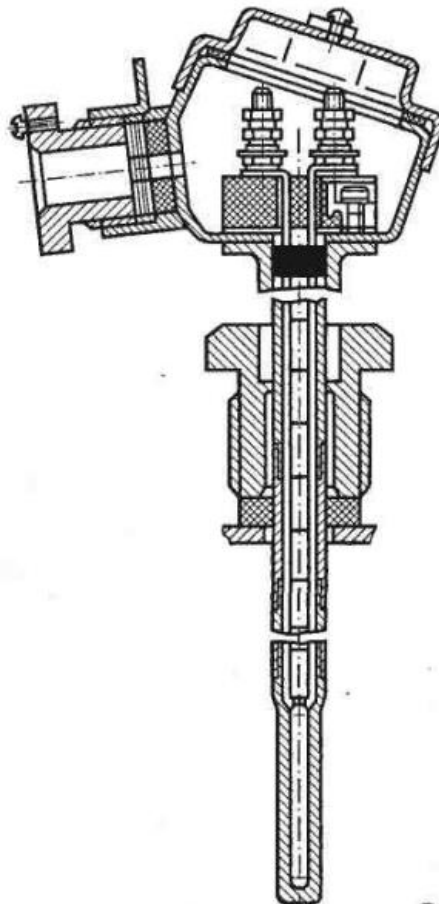


Рисунок 17.8 - Загальний вигляд терморезистора

Деякі терморезистори можуть бути виконані на основі напівпровідникових матеріалів, що мають величину температурного коефіцієнта питомого опору у декілька разів більшу, ніж у металів. На них можна було б створити досить точну систему вимірювань температури, але стає цьому на заваді значна нелінійність їхніх характеристик, незбіг характеристик однотипних елементів, різниця температурних коефіцієнтів питомого опору в сусідніх зразках, значна різниця величин номінальних опорів сусідніх зразків.

І все ж за невисоких температур (до 200...300 °С) напівпровідникові терморезистори застосовуються у системах вимірювань температури, а дещо частіше — і в системах автоматичного регулювання температури.

### Електрохімічні вимірювальні перетворювачі.

Електрохімічні перетворювачі контролюють склад, стан та інші фізико-хімічні властивості речовин чи сумішей або розчинів речовин завдяки створенню певних величин опорів, струму, падіння напруги чи ЕРС, які відповідають певним значенням контрольованих величин.

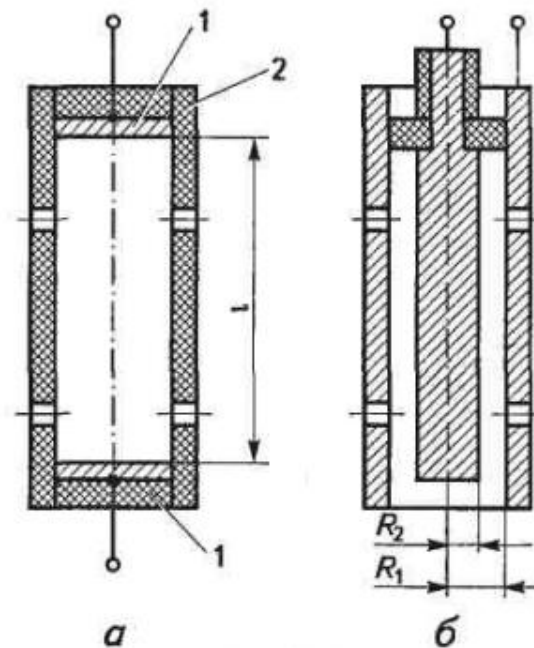



Рисунок 17.9 – Резистивний електролітичний перетворювач а- з плоскими електродами; б – з циліндричними електродами

Такі перетворювачі виконують у вигляді комірки обмеженого розміру, заповненої речовиною, сумішшю або розчином, та електродів, що приєднані до схеми вимірювання електричної величини, функціонально пов'язаної з контрольованою величиною (наприклад, з величиною концентрації).

Резистивні електролітичні перетворювачі широко використовують для вимірювань концентрації розчинів. Ці перетворювачі можуть складатися (рис. 17.9, а) з двох плоских електродів 1, розташованих у торцях



відрізку труби 2, виготовленої з ізоляційного матеріалу. Крізь трубу проходить контрольований розчин. Якщо електроди через амперметр буде підключено до джерела струму (до вторинної обмотки трансформатора), то за величинами напруги і струму можна розрахувати величину опору розчину, що є між електродами. Якщо внутрішні розміри резистивного електролітичного перетворювача (внутрішня довжина труби та площа електродів) відомі, нескладно розрахувати й питомий опір розчину, що протікає упоперек трубки. А вже з величини питомого опору розчину судять про його концентрацію.

Резистивні електролітичні перетворювачі живляться виключно змінним струмом. Якби такі перетворювачі жилися від джерела постійного струму, то через наявність електролізу розчину на його електродах з'явилися би пухирці газів (на одному — водню, а на іншому — кисню), що з часом спотворило б результати вимірювань опору.

У правильності вимірювань концентрації можна бути впевненими лише у тому разі, коли вимірювання проводяться при певній температурі розчину, для якої відома залежність величини опору від величини концентрації.

Крім того, у правильності вимірювань можна бути впевненими також тоді, коли заздалегідь відомо, що концентрація розчину знаходиться у певних межах (наприклад, що у місці вимірювань можуть бути лише незначні величини концентрації, чи, навпаки, великі).

Резистивний перетворювач для визначення концентрації розчинів може бути виконаний з циліндричними коаксіальними електродами, як зображено на рис. 17.9, б. Такий перетворювач доцільно застосовувати для вимірювань концентрації розчинів переважно з великим питомим електричним опором, бо тут довжина ділянки протікання струму через розчин — замала (це різниця між внутрішнім радіусом  $R_1$  зовнішнього електрода і зовнішнім радіусом внутрішнього електрода  $R_2$ ), а площі, між якими протікає струм, — великі. Це дає можливість навіть за наявності великого питомого опору розчину одержати прийнятну для вимірювань величину опору перетворювача.

При виготовленні перетворювачів, подібних до тих, що вже розглянуті, звичайно, необхідно застосувати матеріал, що не руйнується у контрольованому розчині.

Подібні перетворювачі застосовують як стаціонарні, для постійного контролю величини питомого опору розчинів, так і переносні — для періодичного контролю. У перетворювачів періодичного контролю кількість отворів повинна бути дещо більшою, ніж показано на рис. 17.9. Крім того, розташування отворів повинно бути таким, щоб уникнути затримки повітря у зоні заповнення перетворювача рідиною.

#### **Фотоелектричні перетворювачі.**

Фотоелектричні перетворювачі (частіше їх називають фотоелементами), поділяються на три групи: фотоелементи з зовнішнім фотоелементом; фотоелементи з внутрішнім фотоелементом; вентильні фотоелементи

(рис. 17.10). Кожний фотоелемент має свої характеристики, відмінні від характеристик інших фотоелементів, навіть якщо вони належать до однієї групи. Головними характеристиками фотоелементів є:

- світлова характеристика, що показує залежність струму фотоелемента від інтенсивності світлового потоку, який на нього падає;
- спектральна характеристика — залежність величини струму фотоелемента від довжини хвилі променів, що діють на фотоелемент при незмінній напрузі живлення фотоелемента та інтенсивності світлового потоку;
- вольт-амперна характеристика, тобто залежність величини струму фотоелемента від величини прикладеної до нього напруги при незмінній інтенсивності світлового потоку, що падає на фотоелемент;
- частотна характеристика — залежність струму фотоелемента від частоти зміни інтенсивності світлового потоку;
- характеристика зниження чутливості фотоелемента від часу його безперервної роботи.

Для фотоелементів важливими є інтегральна чутливість, що може бути визначена з їхніх світлових характеристик, і спектральна чутливість, що визначається для кожної певної частоти з спектральної характеристики фотоелемента.

Фотоелементи з зовнішнім фотоелементом виконано у вигляді електронної лампи, що має лише анод і катод. При цьому катод виконано світлочутливим у вигляді киснево-цезієвого чи киснево-стибієвого шару, нанесеного на скло. За наявності напруги між анодом і катодом і наявності освітлення світлочутливого шару між катодом і анодом проходить електричний струм, величина якого буде тим більшою, чим більший світловий потік падатиме на катод.

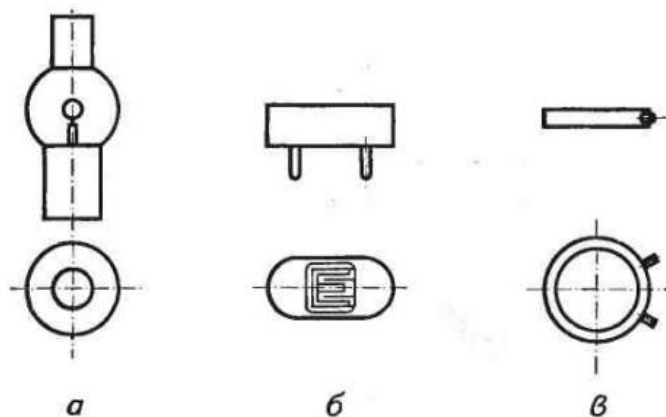


Рисунок 17.10 - Фотоелементи: а – з зовнішнім фотоелементом; б – з внутрішнім фотоелементом; в - вентильний

Залежно від середовища всередині балона фотоелемента вони можуть бути вакуумні чи газонаповнені. Газонаповнені фотоелементи відрізняються від вакуумних тим, що в їхніх балонах інертний газ перебуває під тиском, що не перевищує 1 мм рт. ст.

Характеристики фотоелементів наведено на рис. 17.11. Світлові характеристики двох киснево-цезієвих елементів показані на рис. 17.11, а. Характеристика 1 стосується газонаповненого фотоелемента, а характеристика 2 — вакуумного. Для об'єктивного порівняння напруги, прикладені до обох фотоелементів, були однаковими і дорівнювали 240 В. Графіки свідчать про перевагу газонаповненого фотоелемента над вакуумним, бо перший (газонаповнений) при рівних світлових потоках, що падають на обидва фотоелементи, має набагато більший струм, ніж другий (вакуумний). Але з характеристик також видно, що у газонаповненого фотоелемента величина струму зростає швидше, ніж світловий потік. При підвищенні напруги це може спричинити виникнення самостійного газового розряду з руйнуванням катодного покриття та повним виходом з ладу фотоелемента.

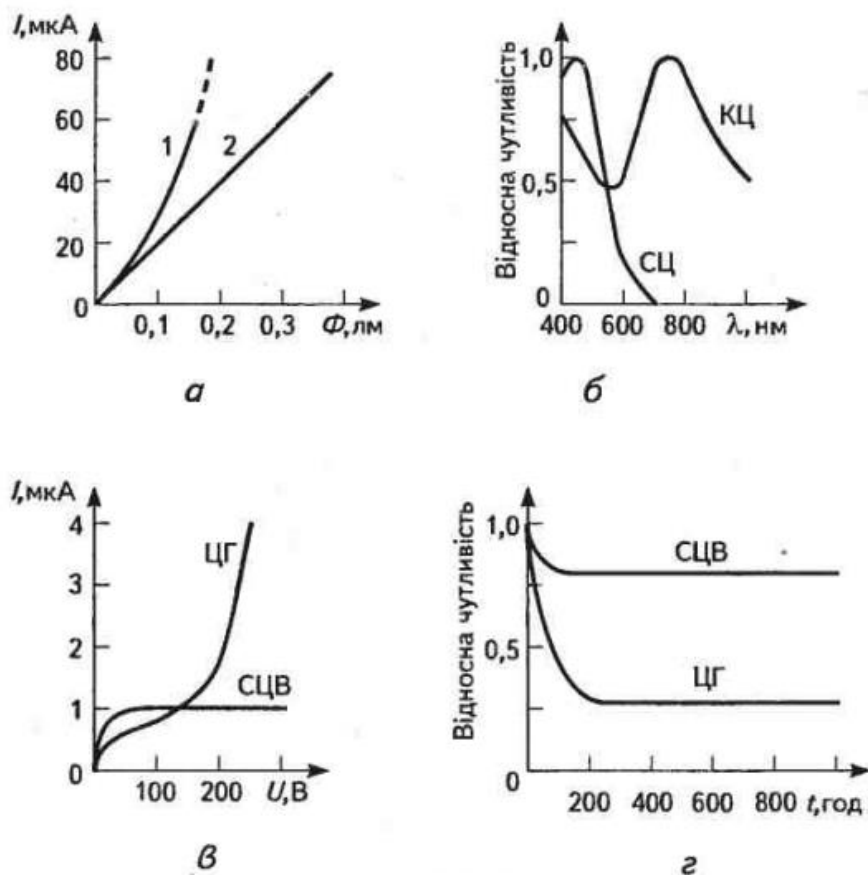



Рисунок 17.11 - Характеристики фотоелементів із зовнішнім фотоелементом: а — світлова; б — спектральна; в — вольт-амперна; г — старіння



Спектральні характеристики фотоелементів зображено на рис. 17.11, б. З характеристик видно, що стибій-цезієвий фотоелемент СЦ доцільно використовувати головним чином у високочастотній частині спектра видимого світла, а киснево-цезієвий КЦ — практично в усій видимій частині спектра.

Вольт-амперні характеристики фотоелементів зображено на рис. 17.11, в. Розглядаючи їх, можна дійти висновку, що при малих напругах більш сприйнятливою буде характеристика вакуумного фотоелемента, бо від нього можна одержати більшу величину струму при рівних напрузі й світловому потоці з газонаповненим фотоелементом. Хоча при більших величинах напруг доцільніше використовувати цезієвий газонаповнений фотоелемент.

Дві характеристики старіння фотоелементів наведено на рис. 17.11, г. Порівняння цих характеристик дає можливість зробити висновок про те, що вакуумні фотоелементи у процесі роботи при незмінних напрузі і світловому потоці можуть зменшувати чутливість (всього на 20 % порівняно з початковою) у меншій мірі, ніж цезієвий газонаповнений фотоелемент. За перші ж 200 годин роботи цей фотоелемент зменшує чутливість майже у чотири рази і далі працює з таким самим зменшенням.

Фотоелементи із зовнішнім фотоелементом завжди потребують підсилення електричних сигналів, бо їхній вихідний струм здебільшого становить лише кілька мікроампер. Тому вони звичайно працюють з електронним чи напівпровідниковим підсилювачем.

Фотоелементи з внутрішнім фотоелементом (фоторезистори) зменшують опір під дією променевої енергії. Виконують їх на основі напівпровідників, а саме: селену, сірчаноокислих талію, вісмуту, свинцю тощо. Кращими напівпровідниками для таких фотоелементів можуть бути германій і силіцій.

Фоторезистори байдужі до зміни полярності напруги, прикладеної до них, і мають характеристики, зовнішньо де-що подібні до розглянутих вище, але здатних пропускати через себе значно більші струми (до кількох десятків міліампер). Для фоторезисторів важливою величиною є кратність зміни величини їхнього опору при переході від повної темноти до повного їх освітлення. Ця кратність може бути від 30...35 до 140...150.

Строк їхньої роботи (без порушення правил експлуатації) необмежений. Але вони досить чутливі до дії вологи і мають значну інерційність (тобто змінюють величину опору через деякий час після зміни інтенсивності освітлення). В усякому разі постійна часу фотоструму у них може досягти кількох сотих секунди.

Вентильні фотоелементи — це фотоелементи з запираючим шаром. Будова такого фотоелемента і схема вмикання його в електричне коло показані на рис. 18.12, а.

Світлова характеристика міднозакисного фотоелемента при різних величинах опорів навантаження показана на рис. 17.12, б. Фотоелемент

складається з чотирьох шарів: 1 — напівпрозорий електрод; 2 — замикаючий шар; 3 — шар закису міді; 4 — мідна основа.

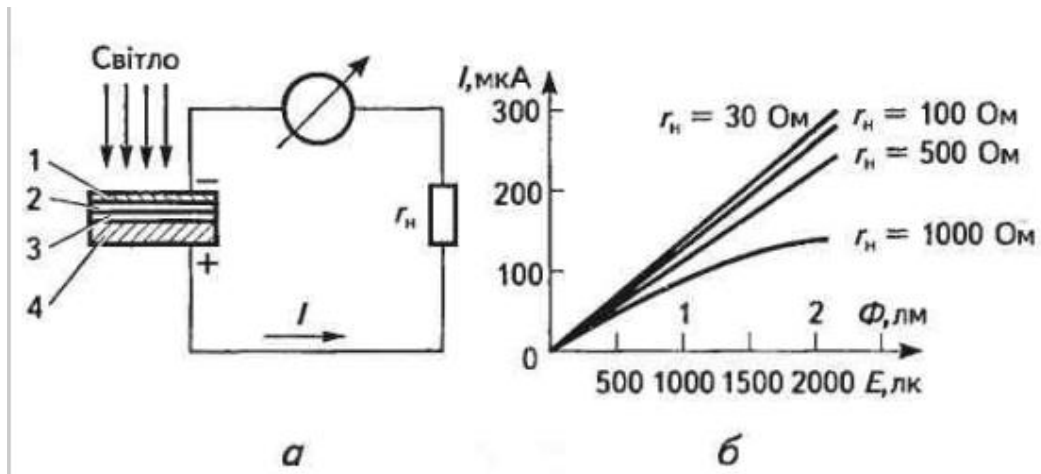


Рисунок 17.12 - Вентильний фотоелемент.  
а — будова фотоелемента; б — світлова характеристика

Замикаючий шар надзвичайно тонкий і тому електрони, розташовані у напівпровіднику 3 поблизу цього шару, одержавши від поглинутих напівпровідником фотонів зі світлового потоку додаткову енергію, перетинають замикаючий шар 2 і створюють негативний заряд на напівпрозорому електроді 1. Мідна основа при цьому одержує позитивний заряд. Через наявність замкненого шляху через вимірювальний прилад і резистор навантаження  $r_n$  між мідною основою 4 і напівпрозорим шаром 1 потече струм. Величина цього струму буде тим більша, чим більшою буде величина світлового потоку і чим меншою — величина опору  $r_n$ , як показано на рис. 17.12,б. Форма спектральних характеристик таких фотоелементів схожа на ту, що була наведена раніше, але величина струмів, які генерує фотоелемент, буде значно більшою і може навіть перевищувати 1 мА. Тобто такий фотоелемент буде здатним безпосередньо живити обмотку будь-якого чутливого реле (наприклад, поляризованого) і, при достатній величині світлового потоку, може викликати його спрацювання.

Світлові перетворювачі часто застосовуються в приладах, що вимірюють неелектричні величини електричним методом. Так, на їхній основі виконують пірметри — для безконтактного вимірювання високих температур нагріву; калориметри — для вимірювань кількості тепла; експозиметри — для вимірювання освітленості об'єктів фото- і кінозйомки; нефелометри — для вимірювань ступеня каламутності рідин чи газів; прилади для вимірювань якості поверхні, вологості по точці роси, дія підрахунку виробів, що пересуваються на конвеєрі, тощо.

## 17.2 Автоматизація вимірювального процесу

Ефективність використання технічних систем у більшості практичних випадків оцінюється на етапі їх експлуатації, але інформативність і ресурси інформаційно вимірювальних систем ІВС визначаються і реалізуються під час їх створення. На цьому етапі основні положення і методи теорії ІВС використовуються у повному обсязі.

Етапи життєвого циклу ІВС. З метою більш глибокого розуміння важливості основних положень теорії ІВС для створення систем вимірювань розглянемо ілюстративну схему послідовності етапів життєвого циклу ІВС представлену на рис. 17.13.

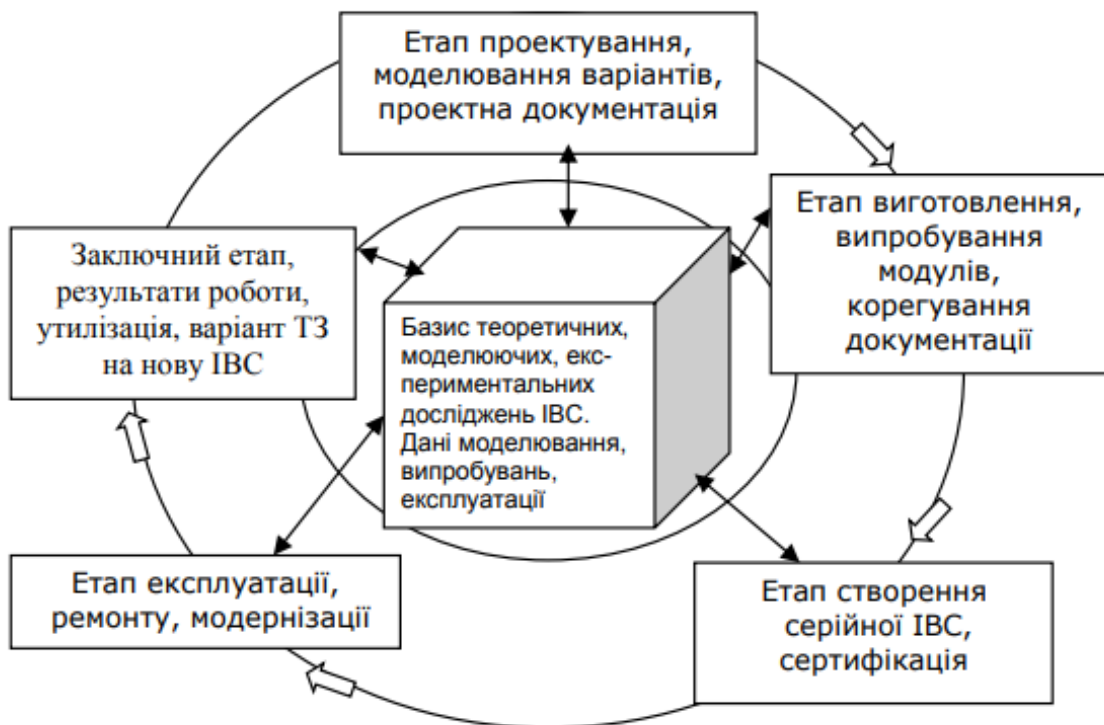


Рисунок 17.13 - Етапи життєвого циклу ІВС

Початковий етап. На початку створення ІВС (далі системи) виконується значний обсяг робіт з обґрунтування, розробки та узгодження технічного завдання на створювану систему між замовником і розробником системи. В технічному завданні на систему наведені всі технічні характеристики, в першу чергу, метрологічні, показники надійності, терміни виконання розробки системи, проведення випробувань, сертифікації та передачі системи в експлуатацію, вартість розробки системи. На цьому етапі використовуються останні досягнення теорії і практики вимірювань для оцінювання можливості розв'язання актуальних і важливих науково-технічних завдань вимірювань конкретної предметної області.

Етап проектування передбачає виконання значного обсягу теоретичних, імітаційних (моделюючих) та експериментальних (лабораторних)


досліджень, на основі результатів яких обґрунтовується оптимальна апаратно-програмна структура системи. Для цього використовується ряд критеріїв (основні з яких спрямовані на досягнення заданої точності вимірювань), розробляються електричні схеми основних апаратних модулів і підсистем, зміст і структури алгоритмічно-програмного забезпечення, технічна та конструкторська документація на виготовлення дослідних і серійних зразків системи, проводяться роботи з підготовки виробництва.

На цьому етапі обґрунтовуються, обчислюються і оцінюються розрахункові характеристики окремих модулів, підсистем і системи в цілому. Такі характеристики є базовими, використовуються на наступних етапах життєвого циклу системи та можуть доповнюватися даними лабораторних і натурних випробувань, експлуатації, коригуватися, уточнюватися, підтверджуватися статистичними гіпотезами з використанням критеріїв згоди. Отже на етапі проектування створюється методологія втілення подальших етапів життєвого циклу системи.

На рис. 17.14 наведені основні результати досліджень, які отримуються на етапі проектування на основі використання напрямів і методів ряду природничих і технічних наук.

Результати використання Напрями, методи	Обґрунтування, обчислення, оцінювання результатів досліджень
Функціональний аналіз, обчислювальна математика, теорія ймовірностей, теорія випадкових функцій	Одновимірні та багатовимірні моделі сигналів, характеристики сигналів, алгоритми оцінювання характеристик сигналів, результати комп'ютерних вимірювальних експериментів, результати функціонування різних варіантів систем.
Теорія сигналів і систем	Оптимізація структур систем, результатів аналізу перетворень сигналів та опрацювання даних вимірювань, методик випробувань модулів, підсистем і систем в цілому на відповідність технічному завданню, резервування модулів, підсистем для забезпечення метрологічної надійності систем.
Теорія вимірювань	Оцінки результатів і невизначеності вимірювань, метрологічних характеристик, методик вимірювань.
Теорії інформації, методи захисту інформації	Оцінки кількості вимірюваної інформації, апаратно-програмні засоби захисту інформації
Математична статистика	Алгоритми перевірки адекватності моделей оцінки результату і невизначеність вимірювань, статистичні критерії

Рисунок 17.14 - Результати на етапі проектування



Автоматизація проектування є важливим фактором, що впливає на рівень працездатності складних технічних систем, оскільки дозволяє вирішити наступні завдання: істотно знизити кількість проектних помилок, підвищити якість конструкторської і технологічної документації, створити умови для багатоваріантного проектування і вибору оптимального варіанту, скоротити терміни проектування, вивільнивши певний час на доопрацювання технічних рішень, узгодження параметрів модулів та підсистем, проведення випробувань.

Етап виготовлення та випробування дослідних зразків модулів, підсистем ІВС. На етапі реалізуються:

- методика і відповідні плани проведення випробувань з використанням засобів вимірювань для отримання експериментальних даних, характеристик і параметрів інформаційних сигналів, метрологічних характеристик дослідних модулів, підсистем;

- відповідна корекція алгоритмічно-програмного забезпечення для визначення метрологічних характеристик модулів і підсистем, а також характеристик математичних моделей за результатами порівняльного аналізу розрахункових і експериментальних характеристик.

За результатами досліджень проводиться коригування проектної та конструкторської документації на розробку серійного зразка системи.

На етапі створення серійного зразка, сертифікації та передачі ІВС в експлуатацію виконуються такі основні роботи:

- підготовка виробництва для виготовлення серійних зразків системи з заданими метрологічними характеристиками;

- реалізуються методики налагоджування різних модулів і підсистема перевірки функціонування системи для виконання заданих функцій;

- випробування і сертифікація серійного зразка системи з використанням метрологічно атестованих вимірювальних (апаратних і програмних) засобів.

Етап експлуатації ІВС є найбільш тривалим в часі і передбачає такі роботи:


- транспортування, налагодження і запуск в експлуатацію системи; моніторинг функціонування системи в заданих режимах з використанням підсистем вимірювань, контролю, діагностики і управління;

- формування бази даних вимірювань функціонування системи з наступним статистичним опрацюванням даних вимірювань характеристик, параметрів інформаційних сигналів;

- реалізація методики довгострокового моніторингу та визначення прогнозованих метрологічних характеристик системи;

- реалізація методики авторського нагляду та ремонту системи;

- коригування математичного і програмного забезпечення варіантів модернізації діючої системи, проведення моделюючих експериментів і формування рекомендацій модернізації системи з метою підвищення ефективності її використання.



Заключний етап життєвого циклу ІВС є найбільш наукомістким в життєвому циклі ІВС і полягає у формуванні даних досліджень всіх етапів, їх систематизації та теоретичному аналізу з питань коректності використання математичного апарату, узагальнення результатів функціонування конкретного виду ІВС. Таке узагальнення результатів досліджень метрологічних характеристик слугує відповідним науковотехнічним, інформаційним, математичним і програмним забезпеченням для створення нових перспективних ІВС.

На даному етапі виконується також роботи з утилізації ІВС як системи, яка вичерпала свій технічний ресурс.

Точність вимірювань. Результат вимірювань без оцінки його точності втрачає практичне значення.

На сьогодні у Міжнародній метрології відбувається еволюційний природний перехід оцінювання якості результатів вимірювань від концепції похибок (умовна назва) до концепції невизначеності (прийнята з 1993 року, як GUM 1993). Таке співставлення має аналогію з переходом від одної міжнародної системи одиниць до іншої.

Відомо, що так звану концепцію похибок називають ще класичною теорією похибок. Вона базується на постулаті існування істинного (точного) значення вимірюваної величини. Абсолютні значення похибки результату вимірювань визначають як різницю між результатом вимірювання величини і її істинним значенням. Використання концепції похибок дало змогу отримати важливі результати теорії і практики вимірювань які до початку ХХ століття сприяли розвитку вимірювань і метрології в цілому.

Невизначеність результату вимірювань. Сам термін «невизначеність вимірювань» означає сумнів стосовно достовірності результату вимірювання. Принциповою відмінністю даного показника якості результату вимірювань від традиційного полягає в наступному: достовірність результатів вимірювань з урахуванням похибок базується на отриманих в процесі проведення вимірювального експерименту даних вимірювань, відомих характеристик засобів вимірювань та умов проведення експерименту, іншої апріорної інформації. В концепції невизначеності такі поняття, як похибка і істинне значення вимірюваної величини замінюються поняттями невизначеність і оціночне значення вимірюваної величини, а поділ (класифікація) видів похибок за різними ознаками замінюється на поділ за способом оцінювання невизначеностей вимірювань за типом А, який ґрунтується на використанні методів математичної статистики, і за типом В – на використанні і інших методів.

Відповідність між показниками якості результатів вимірювань за концепціями похибок та невизначеності подано на рис. 17.15.



Рисунок 17.15 - Відповідність оцінок похибок і невизначеності результатів вимірювань

Методи оцінювання і способи відображення об'єктів невизначеності результатів вимірювань.

За методом оцінювання виділяють невизначеності:

типу А, до яких належать складові оцінювані статистичними методами опрацювання даних багаторазових вимірювань;

типу В, до яких відносяться складові, що оцінюються іншими методами опрацювання даних вимірювань.

За способом відображення виділяють:

стандартну невизначеність результату прямих вимірювань як стандартне середньоквадратичне відхилення (СКВ);

сумарну невизначеність як стандартну невизначеність результату непрямих вимірювань, яку отримують зі значень інших величин, пов'язаних з вимірюваною величиною функціональною залежністю;

розширену невизначеність як інтервальну оцінку вимірювань, яка оцінюється добутком стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення, який залежить від виду закону розподілу і рівнів заданих ймовірностей;

відносну невизначеність – відношення стандартної, сумарної або розширеної невизначеності до оцінки вимірюваної величини.

Класифікація ІВС. У нормативних документах метрології класифікація ІВС не наведена і це пояснюється наступним:

у класифікації ІВС необхідно чітко виділити класифікаційні ознаки, а це для всіх видів і поколінь ІВС зробити практично неможливо;

класифікацію ІВС можна лише умовно провести на певному етапі розвитку ІВС в зв'язку з динамікою змін елементної бази та ІВТ.

Наведена в рис 17.16 класифікація ІВС враховує тенденції сучасного інформаційного етапу розвитку систем вимірювань

Класифікація ІВС Ознаки класифікації	Види ІВС
Функціональне призначення	Системи вимірювальні, автоматичного контролю, технічної діагностики, ідентифікації, розпізнавання образів управління, телеметричні, статистичні, поліметричні.
Режими (алгоритм) функціонування	Постійний, адаптований до динаміки змін величин і умов роботи об'єкта досліджень, віртуальний на основі методів математичного і комп'ютерного моделювання, інтелектуальний з можливостями перебудови структури і виконання функцій вимірювань.
Кількість і динаміка у просторі і часі вимірювальних величин	Одноканальні, багатоканальні, статичні, динамічні, реалізації ІВТ: ІВТ-1D, ІВТ-2D і ІВТ-3D

Рисунок 17.16 - Класифікація ІВС

Значна кількість ознак класифікації ІВС, які використовувались раніше, в тому числі: вид вихідної інформації; вид структурно-функціональної схеми системи; види діалогового режиму оператор-система та інші інтегровані в класифікації ІВС.

Апаратно-програмна реалізація ІВС. Аналізуючи функціонування різних видів ІВС, відзначимо, що всі системи в своєму складі мають вимірювальний канал, як базову і типову підсистему ІВС. Саме вимірювальний канал (ВК) є найбільшою структурною одиницею ІВС, метрологічні характеристики (МХ) якої нормуються.

Вимірювальний канал – конструктивно або функціонально виділена частина ІВС, що виконує закінчену функцію від сприйняття вимірюваної величини до отримання її результату вимірювань, який відображається числом або відповідним йому кодом, або формуванням відповідного аналогового сигналу, один з параметрів якого є функцією значення вимірюваної величини.

Апаратна частина ВК. Структура ВК в більшості випадків є типовою і являє собою послідовне з'єднання різного роду модулів засобів вимірювань. Узагальнена структура ВК ІВС представлена на рис. 17.17.



Рисунок 17.17 - Узагальнена структура ВК ІВС

У сенсорну підсистему ВК входять сенсори (первинні вимірювальні перетворювачі), підсилювачі і фільтри, які у сукупності перетворюють інформацію для вимірювань об'єкта досліджень у вимірювальний сигнал, зазвичай електричний. У теорії ІВС виділений науково-технічний напрям досліджень - сенсорна електроніка. У рамках цього напрямку розробляються нові сенсори фізичних величин, хімічні сенсори, біосенсори, радіаційні, оптичні та оптоелектронні сенсори, акустoeлектронні сенсори, наносенсори і ін. За особливостями функціонування сенсори поділяють на: лінійні або нелінійні; інерційні або безінерційні; з інваріантними (незалежними від зміни певних параметрів і характеристик об'єкту досліджень) або неінваріантними параметрами в часі і / або в просторі. Тому під час оцінювання функціонування ВК ІВС, в першу чергу, проводять аналіз сенсора як одного з основних модулів ВК.


Другий модуль ВК забезпечує підсилення, фільтрацію (узгоджену, оптимальну) з метою зменшення впливу завад, коригування (лінеаризацію) функції перетворення сенсора, зменшення адитивних і мультиплікативних похибок перетворень, нормування вимірювальних сигналів.

У сучасних ІВС як компаратор використовуються аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП). Характеристики АЦП, в першу чергу, частота дискретизації і крок (рівень) квантування за інтенсивністю вимірювальних сигналів, узгоджуються із завданням вимірювання і вибираються на основі аналізу метрологічних характеристик існуючих АЦП.

У загальному випадку отримані з виходу АЦП дані вимірювань в модулі ВК накопичуються, кодуються з метою захисту інформації для подальшого передавання по каналу передачі даних вимірювань.

Як канали зв'язку використовуються: оптоволоконні, лінії зв'язку; радіоканали; високовольтні лінії електропередачі з відповідною каналоутворюючою апаратурою; акустичні і гідроакустичні канали та ін.

Підсистема опрацювання даних вимірювань з відповідним інтерфейсом забезпечує приймання, декодування і опрацювання даних вимірювань з метою отримання результату вимірювань.



Програмна частина ІВС. Розглядаючи ІВС як єдиний апаратно-програмний комплекс виходять з того, що «м'яке обладнання», до складу якого входить функціональне інформаційне, математичне і програмне забезпечення (відповідно ІЗ, МЗ і ПЗ) ) не є самостійними об'єктами і працюють тільки у складі ІВС. Тому працездатність «м'якого обладнання» здебільшого оцінюється не окремо, а за результатами роботи ІС в цілому.

Програмна частина системи має характерні особливості:

вона не схильна до зношування;

якщо виявлені в процесі налагодження і дослідної експлуатації ПЗ помилки усуваються, а нові не вносяться, то такий об'єкт розглядається як «нестаріюча» система (за термінологією теорії надійності);


працездатність програм значною мірою залежить від використовуваної вхідної інформації, оскільки від неї залежить результат реалізація програми; якщо вхідна інформація сама містить дефекти, програма видасть помилковий результат і за відсутності помилок програми;

якщо помилки, що виникають під час роботи, не діагностувати і не усувати, то помилки ПЗ будуть мати систематичний характер;

працездатність ПЗ залежить від області застосування ІВС; у випадку розширення діапазону функціонування або зміни області застосування ІВС працездатність може істотно змінюватися без зміни ПЗ.

Ефективність функціонування апаратної частини ІВС оцінюють шляхом опрацювання статистичних даних за результатами експлуатації певної кількості однотипних зразків ІВС. Можливості використання такого підходу для програмного продукту обмежені, оскільки копії програмного забезпечення ідентичні і разом з їх копіюванням вносяться і однакові дефекти – проектні помилки. Існує й інша можливість використання попереднього досвіду функціонування ПЗ. Характеристики числа допущених проектних помилок є досить стійким показником якості роботи сформованого колективу програмістів і використовуваних ними засобів проектування ПЗ. Реєстрація відомостей про проектні помилки у всіх раніше виконаних проєкта та їх відповідне статистичне опрацювання дає можливість отримати заслуговуючи на довіру вихідні дані для оцінювання працездатності нового ПЗ. Якщо такі дані відсутні, то використовують більш загальні відомості про процес проектування ПЗ або дані результатів налагодження ПЗ розроблюваного проєкту. Щоби за цими даними оцінити працездатність ПЗ, розробляють і досліджують відповідні моделі узгоджені з певним етапом життєвого циклу програми.

На ранніх стадіях проектування використовують опис алгоритмів за входами і виходами (опис «чорного ящика») або структуру алгоритму як сукупність структурних елементів і опис кожного з них за входами і виходами (опис «білого ящика»). Після розроблення текстів програм, можна використовувати параметри програм: словник мови програмування, кількість операцій, операндів, використовуваних підпрограм, локальних міток і ін.



У процесі налагодження та експлуатації ПЗ, коли з'являються статистичні дані про виявлені дефекти, вихідне число дефектів як одну з важливих характеристик якості програмування оцінюють методами математичної статистики.

Моделі працездатності ПЗ і методи її оцінювання поділяються на дві групи:

моделі і методи проектного оцінювання працездатності, що ґрунтуються на вихідних даних, які можна отримати до початку налагодження та експлуатації програм;

моделі і методи статистичного оцінювання працездатності ПЗ, що ґрунтуються на результатах налагодження на етапах дослідної або нормальної експлуатації ІВС.

Як вихідні дані використовуються структурна схема функціонального ПЗ для кожної функціональної самостійної операції, а також опис входів і виходів кожного структурного елемента, між модульних і зовнішніх зв'язків комплексу алгоритмів і програм. Типова структура функціонального ПЗ має у своєму складі ПЗ верхнього і нижнього - рівнів. У свою чергу типова структура функціонального ПЗ нижнього рівня спрямована на опрацювання даних, введення і виведення даних і т. ін.

Кожен алгоритм може бути поділений на секції (модулі) певного розміру відповідно до рекомендацій технології програмування. На ранніх етапах проектування в умовах значної невизначеності до структурних характеристик додають ще рівень використовуваних мов програмування. На більш пізніх етапах, коли вже розроблені тексти програм, можуть бути використані методики проектного оцінювання програмних модулів, а в подальшому і ПЗ в цілому.

Типова структура програмного забезпечення ІВС представлена на рис. 17.18. За функціональним призначенням всі модулі ПЗ поділяються на чотири групи: взаємодії з модулями системи, виділення первинних інформативних параметрів, статистичного опрацювання даних і керування процесом вимірювання.

Програмні модулі взаємодії з компонентами системи забезпечують програмне узгодження цих модулів з ПЗ системи в цілому. Взаємодія ПЗ із апаратними засобами ІВС реалізується шляхом послідовного виклику функцій, які відповідають різним завданням – ініціалізації окремих підсистем, отриманню службових даних, налаштуванню динамічного діапазону та частоти опитування, запуску процедури збирання даних, очікуванню відповіді, отриманню вибірок інформаційного сигналу та завершенню роботи.




Рисунок 17.18 - Типова структура програмного забезпечення ІВС

Крім того ці модулі реалізують такі операції:

- пошук підключеного пристрою;
- отримання ідентифікатора пристрою;
- конфігурування та запуск процесу перетворення;
- перевірку поточного стану процесу збору інформації та передавання сигналу про його завершення;
- зчитування отриманих даних та передавання їх для подальшого опрацювання;
- зупинку процесу збирання даних та завершення сеансу роботи з пристроєм.

Програмні модулі виділення первинних інформативних параметрів забезпечують накопичення первинних даних і їх передавання в інші модулі ПЗ системи для подальшого статистичного оброблення, побудови розподілів інформаційних полів, графічного представлення даних (наприклад, відео та теплових зображень), локалізації місць з перевищенням граничних значень контрольованого параметра, автоматичного розпізнавання класів даних, що відповідають різним станам об'єкта досліджень. Зокрема модуль накопичення первинних даних виконує зберігання вхідних інформаційних масивів даних, зменшення їхньої розмірності за рахунок відбору певних діагностичних ознак, які використовуються для подальшого опрацювання, що дає можливість підвищити ефективність опрацювання даних та роботи системи в цілому, а також нормування вхідних даних для приведення його до заданого діапазону значень.

Модуль опрацювання графічних (відео, теплових полів, розподіл параметрів електромагнітних полів у просторі) даних реалізує наступні алгоритми роботи із зображеннями – підвищення просторової розрізнявальної



здатності, підвищення контрастності, фільтрації зображень, виділення геометричних примітивів, прив'язки до еталонів. Крім того, даний модуль дозволяє проводити геометричні вимірювання з використанням зображень в 2D і 3D просторах для локалізації координат і розмірів об'єктів та його окремих зон (наприклад, дефектів).

Модуль розпізнавання класів даних здійснює класифікацію вхідних даних за певними заданими ознаками, розбиття множини векторів-ознак на кластери та розпізнавання різних класів (образів). Такі модулі можуть розроблятися на основі нейромережових технологій, які дозволяють будувати правила прийняття рішення за мінімально можливого обсягу експериментальних даних.

Суттєве функціональне навантаження в ІВС мають модулі статистичного опрацювання експериментальних даних.

Модуль попереднього цензурування даних вимірювань призначено для зменшення впливу вибірових значень з надлишковими похибками та виявлення прогресуючих чи періодичних трендів. Перша задача вирішується фільтрацією даних, наприклад віконною чи медіанною, в залежності від розмірності вхідного вектору, або застосуванням статистичних критеріїв, які для заданої довірчої ймовірності дозволяють розрахувати граничні вибірові значення.


Ідентифікація законів розподілу експериментальних даних необхідна для підтвердження факту їх однорідності та вибору моделі інформаційних параметрів та характеристик, а також може бути використана як діагностична ознака. Модуль ідентифікації законів розподілу може використовувати різні статистичні інструменти, наприклад направлені критерії перевірки на гауссовість, на рівномірність, апроксимацію законів розподілу лінійних даних кривими Пірсона тощо.

Модуль визначення вибірових статистик оцінює статистичні параметри експериментальних даних з урахуванням визначеного закону розподілу для подальшого використання в розрахунках характеристик вимірюваних параметрів чи полів або прогнозу стану об'єкта вимірювання (контролю). Поля інформаційних параметрів можна будувати як в декартових, так і в полярних координатах.

Програмний модуль визначення характеристик полів дозволяє отримувати зображення полів у 3D просторі, а також досліджувати зміну їх характеристик у часі.

Модуль розрахунку прогнозу здійснює побудову регресійної моделі поведінки вимірюваних параметрів в часі (наприклад, на основі сплайн-апроксимації експериментальних даних).

Модулі керування процесом вимірювання забезпечують задане керування режимами роботи ІВС, в тому числі і в інтерактивному режимі, відображення результатів вимірювань із застосуванням 2D і 3D графіки, налаштування та калібрування окремих складових ІВС та проведення їх діагностики.



Характерні властивості і приклад апаратно-програмної реалізації сучасних ІВС. Аналіз різноманітних і різнопланових завдань вимірювань широкого кола предметних областей застосування різних видів ІВС не дає практичної можливості представити схематично узагальнену структуру ІВС, тобто у кожному конкретному випадку апаратно-програмна реалізація ІВС має свою специфіку і характерні особливості. Але послідовність операцій перетворення інформації для вимірювання об'єкта досліджень у результат вимірювань на основі використання функціональних модулів формування і опрацювання даних вимірювань ІВС дає можливість визначити апаратний склад системи. У залежності від кількості та динаміки у просторі і часі вимірювальних величин ( $n$  величин), загальна структура ІВС включає  $n$  вимірювальних каналів, апаратна і програмна частина одного з них була описана вище.

Апаратна частина ІВС. Наведемо перелік апаратних модулів, які можуть бути включені в структури різних видів ІВС:

- множина різних сенсорів або сенсорних модулів, які розміщені стаціонарно, або можуть переміщатись у просторі по заданому закону;

- множина вимірюваних перетворювачів;

- групи АЦП ЦАП та аналогових пристроїв допускового контролю;

- множина цифрових пристроїв, яка включає пристрої формування імпульсів, перетворення кодів, комутатори, спеціалізовані цифрові обчислювані пристрої, пристрої пам'яті, пристрої порівняння кодів, канали цифрового зв'язку, універсальні обчислювальні пристрої – мікропроцесори, мікроконтролери тощо;

- група цифрових пристроїв виводу, відображення і реєстрації;

- інтерфейсні пристрої, які включають системи шин, інтерфейсні вузли і інтерфейсні пристрої аналогових блоків, які забезпечують приймання сигналів управління і передачі інформації про стан блоків;


- пристрої управління, які забезпечують формування, приймання сигналів управління і їх передачу на виконуючі пристрої, для здійснення впливу на об'єкт дослідження.

Наведені вище функціональні модулі з'єднуються між собою безпосередньо або через стандартні інтерфейси за умови сумісності їх інформаційних, метрологічних, конструктивних, енергетичних та експлуатаційних характеристик.

Необхідність розроблення і удосконалення ІВС обумовлює потребу постійного розвитку теоретичних засад їх створення і функціонування, що стимулює процес включення нових областей знань, необхідних для вирішення актуальних завдань вимірювань.

Вимірювання відіграють важливу роль у розвитку економіки, науки і техніки. Теоретичні основи ІВС є одним із напрямів теорії вимірювань, а ІВС є основним засобом забезпечення єдності вимірювань на практиці.

Об'єктами вимірювань є значна множина явищ, процесів, систем різної природи в значній кількості предметних областях.



Предметами вимірювання є моделі, методи, способи, технічні, інформаційні, програмні та інші засоби забезпечення єдності вимірювань.

Існують три основні завдання вимірювань: гомоморфне відображення інформації для вимірювань об'єкта досліджень у фізичній та математичній моделі, використання однорідності у просторі і стаціонарності у часі мір при проведенні процесів вимірювання та забезпечення захисту інформації. Вирішення вказаних завдань вимірювань об'єднують на базі застосування фізичних і математичних моделей. Математичні моделі вимірюваних сигналів у загальному виді відображають динаміку у просторі і часі вимірювальних величин (фізичних величин).

Класифікація ІВС базується на використанні трьох основних ознак: функціонального призначення; режимів (алгоритмів) функціонування; кількості і динаміки у просторі і часі вимірювальних величин.

### **17.3 Метрологічне забезпечення ІВС**

Сучасний розвиток вимірювальної техніки, зокрема ІВС, ускладнення вимірювальних завдань і умов експлуатації засобів вимірювань, їх системне застосування формує нові вимоги до описання властивостей засобів вимірювань. Прилади, що призначені для самостійного використання, для яких клас точності однозначно визначає комплекс нормованих метрологічних характеристик, практично непридатні для синтезу вимірювальних каналів ІВС. Комплекс метрологічних характеристик повинен вибиратися таким чином, щоб за деякою сукупністю цих характеристик засобів вимірювальної техніки, засобів обчислювальної техніки і характеристик інших пристроїв, що утворюють вимірювальний канал, можна було визначити метрологічні характеристики всього вимірювального каналу. Інтелектуалізація ІВС, включення в їх склад обчислювального компоненту з метою опрацювання результатів вимірювань, оцінювання їх характеристик точності, управління процедурою вимірювань призводить до зростаючого значення метрологічного аспекту розроблення і використання алгоритмів і програм опрацювання даних.

Метрологічне забезпечення ІВС - система наукової, технічної, правової та організаційної діяльності, спрямована на досягнення єдності процесів перетворення інформації, що здійснюється в ІВС і необхідної точності результатів її функціонування.

Єдність процесів перетворення інформації – якість процесів перетворення інформації, при якому їх результати, визначені з використанням метрологічних характеристик інформаційних засобів, можна порівнювати. Необхідною умовою порівнюваності результатів є однаковість метрологічних характеристик.

Точність результату функціонування ІВС – якісна характеристика системи, що відображає близькість дійсного результату функціонування до істинного.

Метрологічна експертиза (складова метрологічного забезпечення ІВС) – аналіз та оцінювання оптимальних науково-технічних рішень, пов'язаних із забезпеченням єдності процесів перетворення інформації, що здійснюються в ІВС.

Результати аналізу особливостей ІВС і пов'язані з цим проблеми їх метрологічного забезпечення рис. 17.19

Об'єктами метрологічного забезпечення ІВС є вимірювальні канали та їх складові - вимірювальні та обчислювальні компоненти.

Багатофункціональність	Забезпечення одночасного вимірювання ряду фізичних величин; побудова узагальнених оцінок на основі великого числа параметрів; обчислення комплексних параметрів
Наявність в складі комп'ютера	Оцінювання метрологічних характеристик алгоритмів і програм обробки результатів вимірювань
Багатоканальність	Оцінка, зменшення або виключення впливу каналів один на одного
Нерозривний зв'язок спеціалізованих ІВС з об'єктом, на якому вони експлуатуються	Проблеми проведення метрологічного обслуговування в умовах неможливості прив'язки до еталону шляхом переміщення ІВС до місця його знаходження. Неможливість калібрування вимірювальних каналів за умови установки сенсорів на об'єкті
Складність опису об'єктів та їх моделювання	Складність обліку впливу об'єктів на точність вимірювання в умовах апріорної невизначеності моделі вимірювального експерименту
Агрегатний спосіб побудови	Можливість дослідження ІВС як закінченого вимірювального засобу тільки на об'єкті
Розподіленість компонентів і складових частин ІВС у просторі	Облік впливу на метрологічні характеристики різних умов експлуатації компонентів ІВС
Можливість зміни складу і структури ІВС в процесі експлуатації	Складність регламентації вимог до систем на момент їх випуску
Наявність динамічних режимів вимірювання	Необхідність дослідження динамічних властивостей ІВС і узгодження їх з об'єктом

Рисунок 17.19 - Результати аналізу особливостей ІВС



Основними завданнями метрологічного забезпечення ІВС є:

аналіз і оцінювання технічних рішень на відповідність нормам точності і вибору параметрів, що підлягають вимірюванню, а також забезпеченості методами і засобами вимірювань;

встановлення єдиного порядку передачі розміру одиниць вимірюваних величин ІВС;

встановлення єдиних вимог до номенклатури, нормування та поданням метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС;

визначення дійсних значень метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС і їх відповідності встановленим нормам;

визначення похибок обчислювальних компонентів вимірювальних каналів ІВС та їх відповідності встановленим нормам;

встановлення вимог до метрологічного нагляду за ІВС і можливості його здійснення;

встановлення повноти робіт з метрологічного забезпечення ІВС і відповідності вимогам нормативної документації з метрології.

Метрологічне забезпечення вимірювальних компонентів вимірювальних каналів ІВС, що випускаються серійно, здійснюється відповідно до нормативної документації з метрології з урахуванням вимог, що стосуються експлуатаційної сумісності.

Державному метрологічному контролю і нагляду підлягають ІВС, які використовуються:

як робочі еталони для калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);

для проведення державних випробувань стосовно затвердження типу ЗВТ;

у сфері охорони здоров'я;

у виробництві і контролі продуктів харчування;

в ході здійснення заходів щодо захисту навколишнього природного середовища, охорони праці та техніки безпеки;

для геодезичних і гідрометеорологічних роботах;

під час проведення торгових операцій, включаючи всі види діяльності, пов'язані з визначенням кількості і якості товарів;

для надання послуг зв'язку;

для державного обліку матеріальних ресурсів (електричної і теплової енергії, газу, нафтопродуктів і т.д.);

для проведення податкових, митних та поштових операцій;

для проведення випробувань і контролю якості продукції державними або іншими уповноваженими органами з метою визначення відповідності продукції обов'язковим вимогам державних стандартів;

під час обов'язкової сертифікації продукції;

для судових, арбітражних, слідчих та інших експертиз, які проводяться від імені державних органів;

на транспорті для забезпечення безпеки руху;

для реєстрації національних і міжнародних рекордів.

Склад робіт з метрологічного забезпечення ІВС. Склад робіт залежить від стадії «життєвого циклу» ІВС (рис. 17.20). Метрологічне забезпечення ІВС здійснюється на всіх етапах їх життєвого циклу.

В процесі розроблення ІВС виконують такі роботи з метрологічного забезпечення:

- метрологічну експертизу технічного завдання на розробку ІВС, конструкторської та програмної документації;
- розроблення програм і методик приймальних випробувань, програм і методик метрологічної атестації ІВС, програм експериментальних досліджень ІВС, програм метрологічної атестації обчислювальних компонентів, методик калібрування ІВС;
- державні приймальні випробування ІВС;
- метрологічну атестацію ІВС одиничного виробництва.

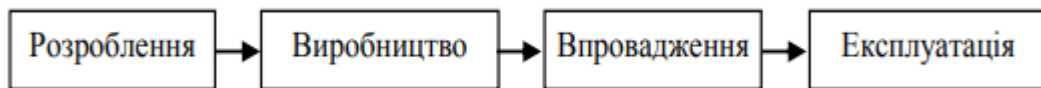


Рисунок 17.20 - Структура основних етапів життєвого циклу ІВС

В ході виробництва ІВС виконують:

- метрологічну експертизу технологічної документації на ІВС, призначених для серійного виробництва;

- первинну повірку (калібрування) ІВС серійного виробництва.

На етапі впровадження ІВС виконують:

- метрологічну атестацію ІВС, монтаж і налагодження яких здійснюють безпосередньо на об'єкті експлуатації;

- метрологічну атестацію ІВС в умовах, які відрізняються від умов, для яких нормовані їх метрологічні характеристики;

- метрологічну атестацію обчислювальних компонентів, вимірювальних каналів ІВС.

Під час експлуатації ІВС виконують:

- метрологічний супровід обчислювальних компонентів вимірювальних каналів ІВС;

- періодичне калібрування вимірювальних каналів ІВС.


Зміст робіт з метрологічного забезпечення ІВС. Основними роботами з метрологічного забезпечення ІВС є:

- встановлення єдиних вимог до метрологічних характеристик ІВС;

- розроблення методів і засобів контролю метрологічних характеристик систем;

- метрологічна експертиза технічної документації;

- забезпечення єдності і достовірності результатів функціонування ІВС шляхом проведення випробувань з метою затвердження типу ІВС або їх одиничних екземплярів;



аналіз стану метрологічного забезпечення ІВС і розроблення на його основі комплексних програм розвитку метрологічного забезпечення систем;

організація і здійснення державного метрологічного контролю і нагляду за станом і застосуванням ІВС;

організація і проведення повірочних та калібрувальних робіт;

організація і проведення робіт з атестації алгоритмів опрацювання інформації, що застосовуються в ІВС.

Аналіз стану метрологічного забезпечення ІВС проводять з метою встановлення: можливості здійснення постійного контролю метрологічної справності систем, що знаходяться в експлуатації; відповідності розробленої документації на ІВС, що виготовляються і знаходяться в експлуатації, вимогам нормативних документів і розроблення на цій основі заходів вдосконалення ІВС та їх метрологічного забезпечення.

Державний метрологічний контроль і нагляд, відомчий контроль встановлюють:

наявність нормативних документів, що регламентують вимоги до організації і порядку проведення розроблення, виробництва і експлуатації ІВС, а також вимоги до точності результату функціонування ІВС, порядок і правила калібрування ІВС;

ефективність проведення метрологічної експертизи конструкторської, технологічної, проектної документації;

правильність експлуатації ІВС і організації контролю їх стану;


наявність необхідних еталонів для здійснення калібрування;

правильність проведення калібрування ІВС в процесі експлуатації і дотримання міжкалібровочних інтервалів.

Мета метрологічної експертизи технічної документації – підтвердження ефективності метрологічного забезпечення, виконання загальних і конкретних вимог до метрологічного забезпечення найбільш раціональними методами і засобами. Конкретні цілі метрологічної експертизи визначаються призначенням і змістом технічної документації.

Метрологічна експертиза технічної документації на вітчизняні ІВС проводиться в установленому порядку метрологічними службами організацій (підприємств), які розробляють, виготовляють і експлуатують ІВС, головними і базовими організаціями метрологічної служби в галузях, а також органами державної метрологічної служби та державними науковими метрологічними центрами, в тому числі акредитованими як державні центри випробувань засобів вимірювань.

Основним змістом метрологічної експертизи технічного завдання (ТЗ) на розроблення (проекування) ІВС, що містить вихідні дані для розроблення, є перевірка достатності наведених в проекті ТЗ вихідних вимог з метою раціональної регламентації метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС на етапі їх розроблення і обґрунтування ефективного способу їх метрологічного забезпечення на наступних етапах життєвого циклу системи.



Основним змістом метрологічної експертизи технічних умов, конструкторської, технологічної, проектної та експлуатаційної документації є перевірка відповідності закладених в зазначеній документації комплексу метрологічних характеристик вимірювальних каналів та їх компонентів, методів і засобів їх визначення, контролю та (або) розрахунку, відповідності вихідним вимогам ТЗ, а також дотримання метрологічних правил, вимог і норм, що регламентуються в нормативній документації. Зокрема, перевіряють:

- наявність в технічних умовах і експлуатаційній документації вичерпного переліку вимірювальних каналів і метрологічних вимог до них;

- придатність до контролю конструкції ІВС;

- наявність у проектній документації, призначеній для монтажу та налагодження ІВС на об'єкті, вимог до параметрів і характеристик, необхідних для контролю якості монтажу ІВС;

- наявність і зміст протоколів, актів, журналів, звітів і т.п. попередніх випробувань стосовно метрологічних властивостей ІВС.

Атестація алгоритмів опрацювання інформації, що застосовуються в ІВС проводиться для визначення того, якою мірою алгоритми обчислень відповідають функції, що зв'язує вимірювану величину з результатами прямих вимірювань (зі значеннями величини на вході вимірювальних компонентів ІВС).

Зазвичай виникають невідповідності викликані можливостями обчислювальної техніки і вимушеними спрощеннями алгоритмів обчислень (лінеаризацією функцій, їх дискретними представленнями і т.п.).

Випробування для затвердження типу та власне затвердження типу проводяться для ІВС, що підлягають застосуванню в сферах на які поширюється державний метрологічний контроль і нагляд.

Випробування для добровільної "сертифікації відповідності" і "сертифікації відповідності" проводяться для ІВС, що не підлягають застосуванню у вищевказаних сферах. Якщо в сфері поширення державного метрологічного контролю і нагляду застосовується тільки частина із загальної кількості вимірювальних каналів ІВС, а інша частина – поза цією сферою, то випробуванням з метою затвердження типу ІВС підлягає тільки перша частина вимірювальних каналів.

Повірці і калібруванню підлягають вимірювальні канали ІВС, що застосовуються в сферах поширення державного метрологічного контролю і нагляду.


Зміст робіт з повірки (калібрування) визначається документами на методику калібрування ІВС.

Для проведення метрологічної атестації обчислювальних компонентів вимірювальних каналів ІВС до розгляду надають:

- програмну документацію на обчислювальний компонент;

- інформацію про діапазони зміни вхідних даних та їх похибки;

- програму і методику метрологічної атестації обчислювального компоненту;



вихідний текст програми на електронних носіях;  
відомості про технічні характеристики і параметри засобів обчислювальної техніки;  
проект програми і методики метрологічного супроводу обчислювального компоненту.

Програма і методика метрологічної атестації обчислювальних компонентів може бути представлена окремим документом або складовою частиною програми метрологічної атестації ІВС.

Під час проведення метрологічної атестації обчислювальних компонентів визначають:

- оцінки похибок обчислювальних компонентів і їх відповідність вимогам ТЗ на розробку;
- придатність обчислювальних компонентів для використання в складі ІВС.

Під час метрологічного супроводу обчислювальних компонентів визначається:

- оцінка похибок обчислювальних компонентів після модифікації і відповідність їх ТЗ на розробку;
- ступінь впливу модифікації обчислювальних компонентів на їх метрологічні властивості;
- доцільність проведення метрологічної атестації обчислювальних компонентів після модифікації;
- придатність обчислювального компонента до використання в складі ІВС після модифікації.

Метрологічний супровід обчислювальних компонентів проводять відповідно до програми і методики супроводу.

### **Основні метрологічні характеристики ІВС**

Комплекси метрологічних характеристик ІВС регламентуються в нормативній, технічній та проектній документації, а саме: стандартах технічних вимог (умов), технічних завданнях, технічних умовах, конструкторській, технічній, експлуатаційній та іншій документації.


Основні принципи регламентування та нормування метрологічних характеристик ІВС. Метрологічні характеристики відображають властивості засобів вимірювань (вимірювальних каналів), які мають визначальний вплив на результат і точність вимірювань.

Нормування метрологічних характеристик - це встановлення комплексу метрологічних характеристик і способів їх подання.

Загальні принципи нормування, що застосовуються до ІВС:

- можливість порівняння і вибору засобів вимірювання;
- можливість визначення похибки (невизначеності) вимірюваної величини з урахуванням нормованих метрологічних характеристик практично реалізованими методами;

- можливість визначення оцінки похибки (невизначеності) результатів вимірювань, проведених за допомогою даного засобу вимірювання.



Комплекс метрологічних характеристик повинен включати в себе характеристики, інваріантні до умов застосування і режиму роботи.

Способи подання метрологічних характеристик повинні забезпечувати простоту їх контролю.

Особливості ІВС обумовлюють специфіку регламентації їх метрологічних властивостей, при цьому слід враховувати: особливості випуску та комплектації систем; умови їх експлуатації з урахуванням просторового розподілу компонентів; використання в складі систем складних обчислювальних пристроїв.

Розглянемо докладніше вплив особливостей ІВС на регламентацію їх метрологічних характеристик.

1. Якщо ІВС випускається і комплектується як єдине ціле, то в нормативній документації встановлюються метрологічні характеристики вимірювального каналу в цілому і методи їх контролю. Якщо ІВС будується за агрегатним принципом, то регламентуються розрахункові метрологічні характеристики і методи розрахунку метрологічних характеристик вимірювального каналу системи за метрологічними характеристиками компонентів, які входять до їх складу, або нормують індивідуальні характеристики вимірювального каналу і методи їх експериментального визначення.


2. Якщо всі компоненти ІВС знаходяться в однакових зовнішніх умовах, то функції впливу величин та додаткові складові похибки (невизначеності), що виникають внаслідок їх дії, нормуються як для звичайних засобів вимірювань. Якщо вони знаходяться в різних зовнішніх умовах, то нормування і визначення величин впливу є складним завданням, для вирішення якого вдаються до методів планування експерименту. Якщо функція впливу однієї величини впливу на метрологічні характеристики залежить від інших величин впливу, необхідно пронормувати і визначити багатовимірні функції впливу і проводити багатофакторний експеримент.

3. Якщо використовуються аналогові обчислювальні пристрої, то їх розглядають як звичайний вимірювальний компонент системи і відповідним чином нормують їх метрологічні характеристики. Якщо використовують складні обчислювальні пристрої (включаючи ПЕОМ), то виникає завдання регламентації метрологічних характеристик алгоритмів і програм обчислень.

Основною структурною одиницею будь якої ІВС є вимірювальний канал – послідовний ланцюг вимірювальних компонентів поєднаних каналами зв'язку. Початком вимірювального каналу є або вхід системи, або вихід проміжного пристрою, від якого розгалужуються кілька таких послідовних ланцюгів; кінцем – вихід системи або вхід системи розгалуження.

Таким чином, щоб досить повно описати метрологічні властивості системи, необхідно пронормувати метрологічні характеристики:

- вимірювальних каналів системи;
- вимірювальних компонентів системи;
- аналогових обчислювальних компонентів;



алгоритмів обчислення, що реалізуються цифровими обчислювальними компонентами.

Для ІВС регламентуються метрологічні характеристики вимірювальних каналів в цілому, метрологічні характеристики компонентів, що входять до складу вимірювальних каналів у вигляді нормованих значень, які оцінюються експериментально і (або) за результатами відповідних розрахунків.

Регламентація метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС не виключає нормування метрологічних характеристик їх окремих компонентів, що забезпечує відповідність метрологічних властивостей вимірювальних каналів регламентованим і взаємозамінність компонентів.

Для вимірювальних каналів ІВС, як правило, регламентуються ті характеристики, які можуть застосовуватися як окремо, так і в комбінаціях:

- а) нормовані метрологічні характеристики і методи їх контролю;
- б) значення метрологічних характеристик, одержані розрахунковим шляхом і методи їх розрахунку за характеристиками компонентів;
- в) перелік метрологічних характеристик, визначених експериментально, і методи їх експериментального оцінювання;
- г) перелік або значення розрахункових характеристик похибки вимірювань, які виконуються за допомогою вимірювальних каналів ІВС, і методи їх розрахунку за метрологічними характеристиками компонентів та значеннями показників умов експлуатації.

Для ІВС, до складу яких входить обчислювальний компонент, нормуються характеристики точності алгоритмів опрацювання результатів вхідних вимірювань для отримання кінцевих результатів вимірювань, що реалізуються обчислювальним компонентом відповідно до заданої програми. Метрологічні характеристики повинні враховувати вплив алгоритму опрацювання даних на методичні похибки вимірювань і трансформацію похибок вихідних вимірювань в процесі опрацювання.

Остаточний вибір доцільного способу регламентації метрологічних характеристик ІВС є складним багатоваріантним завданням і здійснюється на основі аналізу особливостей конкретних видів ІВС.

Метрологічні характеристики вимірювальних каналів ІВС, які нормуються або визначаються розрахунковим шляхом. Комплекс метрологічних характеристик для конкретних вимірювальних каналів ІВС, які нормуються або визначаються розрахунковим шляхом за нормованими характеристиками компонентів, вибираються із загального переліку, до якого входять наступні метрологічні характеристики вимірювальних каналів ІВС:

- 1) номінальна статична характеристика перетворення вимірювального каналу ІВС, який закінчується вимірювальним перетворювачем або вимірювальним приладом зі шкалою, проградуєваною в одиницях, відмінних від одиниць вимірювання вхідного сигналу вимірювального каналу;
- 2) вихідний код, число розрядів коду, номінальна ціна одиниці найменшого розряду коду вимірювального каналу ІВС, призначеного для видачі результатів у цифровому виді;

3) характеристики систематичної складової похибки вимірювального каналу ІВС (межа  $\Delta_{с,доп}$  допустимого значення систематичної складової похибки вимірювального каналу ІВС). За необхідності допускається нормувати найбільшу допустиму зміну систематичної складової на заданому інтервалі часу або зміну в часі меж допустимої систематичної складової похибки. Також додатково до межі  $\Delta_{с,доп}$  може бути пронормовано середньоквадратичне відхилення  $\sigma(\Delta_c)$  систематичної складової похибки, яке розглядається як випадкова величина, властива множині вимірювальним каналам ІВС даного типу;

4) характеристики випадкової складової похибки вимірювального каналу ІВС:

а) межа допустимого значення середньоквадратичного відхилення випадкової складової похибки  $\sigma_{доп}(\Delta)$  вимірювального каналу ІВС;

б) межа допустимого значення середньоквадратичного відхилення і номінальна нормалізована (виражена в частках дисперсії) автокореляційна функція  $r(\tau)$  або номінальна спектральна щільність  $S(\omega)$  і межі допустимих відхилень від наведених номінальних функцій випадкової складової похибки вимірювального каналу ІВС;

5) характеристика похибки  $\Delta$  вимірювального каналу ІВС (межа  $\Delta_{доп}$  допустимого значення похибки вимірювального каналу ІВС);

б) межа допустимого значення варіації вихідного сигналу  $b_{доп}$  вимірювального каналу ІВС, які закінчуються вимірювальним перетворювачем або приладом;

7) характеристики, що відображають взаємодію вимірювального каналу ІВС з об'єктом;

8) динамічні характеристики вимірювальних каналів ІВС:


а) номінальні функції зв'язку між змінними в часі вхідним і вихідним сигналами (передавальна функція, імпульсна вагова функція, перехідна характеристика, амплітудно-фазо-частотна характеристика тощо) і межі допустимих відхилень від номінальних функцій;

б) час встановлення вихідного сигналу  $t_y$  каналу ІВС; (для конкретного вимірювального каналу ІВС динамічна характеристика з наведеного списку вибирається з урахуванням практичної можливості її нормування).

9) номінальна функція впливу  $\psi(\xi)$  і межі допустимого відхилення від номінальної функції;

10) найбільші допустимі зміни  $\Delta L(\xi)$  метрологічних характеристик вимірювального каналу ІВС, викликані відхиленням зовнішніх факторів впливу та неінформативних параметрів вхідного сигналу від номінальних значень;

11) динамічні функції впливу вимірювального каналу ІВС, які необхідні у випадку швидких змін величин, що впливають (наприклад, для ІВС, встановлених на рухомих об'єктах), які призводять до виникнення перехідних процесів у ланцюгах вимірювальних каналів ІВС і суттєво впливають



на похибку вимірювань; для конкретного вимірювального каналу динамічна характеристика вибирається з урахуванням практичної можливості її нормування;

12) характеристики лінії зв'язку, якщо вона не входить до складу комплектуючих компонентів ІВС на момент випуску та з'являється як компонент системи тільки під час монтажу на об'єкті.

Розглянемо деякі рекомендації, які слід враховувати при нормуванні метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС.

Нормування метрологічних характеристик компонентів вимірювального каналу ІВС здійснюється з урахуванням тих же чинників, що і для вимірювальних каналів в цілому. Нормування метрологічних характеристик аналогових обчислювальних компонентів здійснюється аналогічно нормуванню метрологічних характеристик вимірювальних компонентів.

Найбільші допустимі межі, функція впливу або динамічна функція впливу нормуються окремо для кожної впливаючої величини; зазначені характеристики нормуються також для спільних впливів цих величин, якщо функція впливу кожної величини істотно залежить від інших величин впливу.

Якщо довжина вимірювального каналу ІВС така, що одна і та ж величина впливу для різних частин вимірювального каналу може одночасно прийняти суттєво різні значення, то тоді для вимірювального каналу нормується  $\psi(\xi)$  або  $\psi(\xi)$  для кожної з таких частин вимірювального каналу окремо і для різних його частин встановлюються різні нормальні і робочі умови.


Метрологічні характеристики вимірювальних каналів ІВС, які визначаються експериментально або розрахунково-експериментальним шляхом. Комплекс метрологічних характеристик для конкретних вимірювальних каналів ІВС, які визначаються експериментально, або розрахунковим шляхом за метрологічними характеристиками компонентів, отриманих експериментально, вибирається із загального переліку, до якого входять наступні метрологічні характеристики вимірювальних каналів ІВС:

1) градувальна характеристика вимірювального каналу ІВС;  
2) таблиці поправок вимірювального каналу для ІВС, які закінчуються показуючим або реєструючим вимірювальним приладом зі шкалою, проградуйованою в одиницях вхідного сигналу каналу;

3) характеристики систематичної складової похибки вимірювального каналу ІВС - верхня  $\Theta_v$  і нижня  $\Theta_n$  межі не виключеної систематичної складової похибки вимірювального каналу ІВС та ймовірність  $P(\Theta_c)$ , з якою не виключена систематична складова похибки знаходиться в даних межах; за необхідності може визначатися найбільша зміна систематичної складової похибки на заданому інтервалі часу;

4) характеристики випадкової складової похибки вимірювального каналу ІВС:

а) середньо квадратичне відхилення (СКВ)  $\sigma(\Delta)$ , його довірчі межі й відповідна довірча ймовірність  $P_\sigma$ ;



б) СКВ  $\sigma(\Delta)$ , його довірчі межі й довірна ймовірність  $P_\sigma$  та нормалізовані автокореляційна функція  $r(\tau)$  або спектральна щільність  $S(\omega)$  випадкової складової похибки з зазначенням довірчих меж цих функцій і відповідних їм довірчих ймовірностей  $P_r$  або  $P_s$ ;

5) варіація  $h$  вихідного сигналу вимірювального каналу ІВС, який закінчується вимірювальним перетворювачем, або варіація показань вимірювального каналу, який закінчується вимірювальним приладом, довірчі межі її визначення і відповідна їм довірна ймовірність;

6) характеристики, які відображають взаємодію вимірювального каналу ІВС з об'єктом вимірювання і похибки їх експериментального визначення;

7) неінформативні параметри вихідного сигналу вимірювального каналу ІВС, який закінчується вимірювальним перетворювачем і похибка їх експериментального визначення;

8) динамічні характеристики вимірювального каналу ІВС:

а) функція зв'язку між змінними в часі вхідними та вихідними сигналами (передавальна функція, імпульсна вагова функція, перехідна характеристика, амплітудно-фазо-частотна характеристика тощо) і похибка її експериментального визначення;

б) час встановлення показань або вихідного сигналу вимірювального каналу і похибка його експериментального визначення; (для конкретного вимірювального каналу ІВС динамічна характеристика з наведеного вище переліку вибирається з урахуванням практичної можливості її експериментального визначення);

9) функція впливу вимірювального каналу ІВС і похибка її експериментального визначення;


10) динамічні функції впливу вимірювального каналу ІВС. Для конкретного вимірювального каналу динамічна характеристика вибирається з урахуванням практичної можливості її експериментального визначення.

Регламентування метрологічних характеристик компонентів проводиться з урахуванням тих же чинників, які передбачені і для вимірювальних каналів.

Основні принципи контролю та визначення метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС. Контроль і визначення метрологічних характеристик вимірювальних каналів проводять з метою:

а) забезпечення якості розроблення та виготовлення ІВС в частині дотримання метрологічних вимог до них на підприємствах, які розробляють і виробляють ІВС;

б) перевірки якості монтажу та налагодження ІВС (включаючи дотримання вимог до параметрів ліній зв'язку, які впливають на метрологічні характеристики вимірювальних каналів) в процесі і після встановлення ІВС на об'єкті; можливості проведення дослідної експлуатації і передачі в постійну експлуатацію в частині дотримання метрологічних вимог, закладених в проекті;



в) перевірки та збереження метрологічних характеристик ІВС в процесі експлуатації.

Контроль і визначення метрологічних характеристик здійснюється експериментально «наскрізним методом», тобто шляхом подачі на вхід вимірювального каналу ІВС зразкового сигналу (імітує вимірювану величину) і формування його вихідного сигналу (результату вимірювання). Отримані в результаті експерименту значення метрологічних характеристик слугують безпосередньо як визначені або ж порівнюються з нормованими значеннями.

Якщо експеримент проводився в конкретно реалізованих умовах застосування ІВС, відмінних від тих (зазвичай нормальних), для яких нормувалися або визначалися метрологічні характеристики вимірювального каналу, то отримані в процесі експерименту значення порівнюються з розрахованими значеннями тих же характеристик, обчислених для конкретно реалізованих умов за нормованими або визначеними метрологічними характеристиками компонентів, які входять до складу вимірювального каналу.

Необхідними умовами використання «наскрізного методу» визначення або контролю метрологічних характеристик є:

а) наявність доступу до входу вимірювального каналу (обмеження доступу може бути викликано конструкцією або способами установки сенсорів, температурними умовами або наявністю небезпечного середовища в місцях їх розташування і т.д.);


б) можливість формування необхідного набору всіх значень величин впливу, характерних для умов експлуатації;

в) наявність еталонів і засобів задавання вимірюваних величин.

Значення метрологічних характеристик можуть бути отримані розрахунковим (розрахунково-експериментальним) методом. Він використовується в тих випадках, коли для вимірювального каналу не виконуються умови «наскрізного методу» контролю або визначення його метрологічних характеристик. Метод полягає в наступному:

а) у вимірювальному каналі виділяється та його частина, яка складається з компонентів (або їх сукупності) з нормованими або експериментально визначеними метрологічними характеристиками, для якої застосовується «наскрізний метод» контролю її метрологічних характеристик (доступна частина). Бажано, щоб в доступну частину вимірювального каналу входила максимальна кількість його компонентів, що дозволить дослідити нормовані метрологічні характеристики лінії зв'язку і функціональних перетворювачів, пристроїв зв'язку з об'єктом, обчислювальних пристроїв. Для сучасних ІВС як доступну частину доцільно використовувати вимірювальні канали інтегрованих компонентів, на основі яких створюються ІВС;

б) здійснюється контроль або визначення метрологічних характеристик доступної частини вимірювального каналу;



в) обчислюються значення метрологічних характеристик вимірювального каналу в цілому за нормованими або експериментально визначеними метрологічними характеристиками доступної частини і нормованим або приписаним (за результатами раніше проведених експериментальних визначень метрологічних характеристик) недоступної частини вимірювального каналу. Якщо недоступна частина вимірювального каналу робить основний внесок в результуючу похибку вимірювального каналу, то даний спосіб стає практично чисто розрахунковим, оскільки не дивлячись на експериментальну перевірку доступної частини, її похибка становить незначну частину в сумарній похибці вимірювального каналу.

Для визначення метрологічних характеристик число експериментів (обсяг вибірки) і максимально допустима похибка вимірювань в даній точці діапазону вимірювального каналу ІВС встановлюються в документації таким чином, щоб для експериментально визначених характеристик забезпечувалися довірчий інтервал і довірна ймовірність не гірші за задані.

Характеристики точності алгоритмів опрацювання результатів вимірювань, що реалізуються обчислювальним компонентом, підлягають одноразовому контролю (визначенню) експериментальними, аналітичними або методами імітаційного моделювання. Для контролю або визначення метрологічних характеристик аналогових обчислювальних компонентів використовуються ті ж принципи, що і для вимірювальних компонентів ІВС.

## **Висновки**


Автоматизовані вимірювальні системи (АВС) є ключовою складовою сучасних технічних комплексів, забезпечуючи безперервний збір, обробку та передачу даних про параметри технологічних процесів. Їх точність та надійність безпосередньо впливають на якість керування та ефективність виробництва.

Вимірювальні перетворювачі (датчики) відіграють центральну роль у АВС, оскільки перетворюють фізичні або хімічні величини у зручну для обробки електричну форму. Вони класифікуються за принципом дії на:

- механічні (реостатні, тензорезистивні),
- індуктивні, індукційні, взаємоіндуктивні,
- ємнісні, теплові (термопары, терморезистори),
- електрохімічні,
- фотоелектричні.

Кожен тип перетворювачів має свої особливості, переваги та обмеження, які необхідно враховувати при проектуванні ІВС. Наприклад, термопары забезпечують широкий діапазон вимірювання температур, а ємнісні датчики — чутливі до малих переміщень та складу середовища.

Проектування ІВС проходить через ряд послідовних етапів життєвого циклу: постановка завдання, моделювання, розробка апаратної та



програмної частини, випробування, сертифікація, експлуатація та утилізація. На кожному етапі необхідно забезпечити відповідність системи вимогам метрології.


Оцінка точності в автоматизованих системах здійснюється як за класичною концепцією похибок, так і за сучасною концепцією невизначеності (GUM). Обидва підходи мають на меті підвищення достовірності результатів вимірювань.

Апаратно-програмна структура ІВС включає вимірювальні канали, які складаються з сенсорів, підсилювачів, фільтрів, АЦП, пристроїв зберігання та передавання даних, а також програмних модулів аналізу, візуалізації, класифікації та керування. Ефективність ІВС залежить від гармонійної взаємодії апаратної та програмної частини.

Сенсорна електроніка та інтелектуальні методи обробки даних (нейронні мережі, статистичне моделювання, класифікація) є основою побудови сучасних ІВС з високою точністю, надійністю та адаптивністю до змін технологічного середовища.


### **Контрольні запитання до теми 17**

1. Що таке вимірювальні інформаційні системи (ІІС), і які їх основні функції?
2. Яка структура автоматизованої вимірювальної системи (АІС), і які її основні компоненти?
3. Які вимоги ставляться до автоматизованих вимірювальних систем?
4. Що таке сенсор, і яка його роль у вимірювальній системі?
5. Як працюють реостатні і тензорезистивні перетворювачі механічних величин?
6. У чому суть роботи індуктивних і взаємоіндуктивних перетворювачів, і для яких цілей вони використовуються?
7. Які принципи роботи ємнісних перетворювачів і як вони застосовуються у вимірюваннях?
8. Як працюють теплові вимірювальні перетворювачі, такі як термомпари та терморезистори?
9. Що таке електрохімічні перетворювачі, і для яких вимірювань вони використовуються?
10. Як функціонують фотоелектричні перетворювачі, і які їх основні характеристики?
11. Що таке етапи життєвого циклу вимірювальних інформаційних систем, і які ключові роботи виконуються на кожному етапі?
12. Які методи забезпечення точності вимірювань застосовуються в автоматизованих вимірювальних системах?
13. Що таке концепція невизначеності у метрології, і як вона відрізняється від концепції похибок?
14. Як класифікуються автоматизовані вимірювальні системи?
15. Що таке вимірювальний канал (ІК), і яка його структура?

- 
16. Які види сенсорів використовуються у сучасних вимірювальних системах, і які їх особливості?
  17. Як програмне забезпечення забезпечує функціонування вимірювальних інформаційних систем?
  18. Які основні етапи проектування ВІС, і як вони впливають на якість системи?
  19. У чому полягає роль програмного забезпечення у зборі, збереженні та аналізі даних вимірювань?
  20. Як стандартизація і сертифікація забезпечують якість вимірювальних інформаційних систем?

### **Використана література до теми 17**

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.
2. Защепкіна Н. М. Метрологія [Електронний ресурс]: навчальний по-сібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
3. Черепанська І. Ю. [та ін.] Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра га-лузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та при-ладобудування", 13 "Механічна інженерія" / Поліс. нац. ун-т. Жи-томир: Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с. ISBN 978-617-7684-63-2.
4. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання па-раме-трів електричних кіл: навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 165 с. ISBN 978-617-7859-33-7.
5. Бабіченко А. К. [та ін.] Метрологія та основи вимірювань: на-вчаль-но-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабі-ченка. Харків: Мірошніченко О. А., 2023. 140 с. ISBN 978-617-8130-25-1.
6. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, ме-трологія та управління якістю: навчальний посібник / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.
7. Янчук І. В., Галунка О. Д., Сумарюк О. В. Метрологія і стандар-тизація: конспект лекцій / Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. Чер-нівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2021. 103 с.
8. Макота О. І., Олійник Л. П., Комаренська З. М. Метрологія, ста-нда-ртизація, сертифікація та акредитація: навчальний посібник / Нац. ун-



т "Львів. політехніка". Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2019. 171 с. ISBN 978-966-941-354-3.

9. Поліщук Є. С. [та ін.] Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 544 с.

10. Соколов С. В., Соколов О. С., Антоненко С. С. Контроль і вимірювання в технологічних та енергетичних системах: конспект лекцій. Суми: Сумський державний університет, 2020. 242 с.

11. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.

12. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. [та ін.] Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. 496 с.

13. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Оріховський Р. Я. Електричні вимірювання: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2003. 272 с.

14. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 521 с.

15. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.

16. Токар Ю. С., Караван Ю. В. Основи стандартизації, метрології та сертифікації: посібник. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. 247 с.

17. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: навчальний посібник. Київ: Знання-Прес, 2003. 180 с.



Навчально-методичне видання

Шрамко Юрій Юрійович

**«Метрологія та електричні вимірювання»  
курс лекцій з дисципліни**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції