

Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет
ім. Дмитра Моторного

НЕСТЕРЧУК Д.М.

КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ З ОСНОВАМИ МЕТРОЛОГІЇ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Мелітополь
2020 рік

**Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного**

НЕСТЕРЧУК Д.М.

КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ З ОСНОВАМИ МЕТРОЛОГІЇ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*Рекомендовано Вченою радою
факультету енергетики і комп'ютерних технологій
Таврійського державного агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного
як навчальне видання для підготовки здобувачів
ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

**Мелітополь
2020**

УДК 006.91(075)+621.317.3 (075)

H55

*Дозвіл до впровадження та видання надано Вченою радою
факультету енергетики і комп'ютерних технологій
Таврійського державного агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного
(протокол № 5 від «14» січня 2020 р.)*

Укладач:

Нестерчук Д.М., доцент кафедри «Електротехніка та електромеханіка імені професора В.В. Овчарова», Таврійський ДАТУ імені Дмитра Моторного

Рецензенти:

Назаренко Ігор Петрович, д.т.н., професор, декан факультету енергетики і комп'ютерних технологій, Таврійський ДАТУ імені Дмитра Моторного

Лобода Олександр Іванович, к.т.н., старший викладач кафедри «Електроенергетика і автоматизації», Таврійський ДАТУ імені Дмитра Моторного

Нестерчук Д.М.

H55 Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: конспект лекцій/ Д.М.Нестерчук. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. - 256 с.

В конспекті лекцій з дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології» зібраний, систематизований та наочно викладений теоретичний матеріал з основ метрології, теорії вимірювань, забезпечення єдності вимірювань, наведені загальні відомості про засоби вимірювальної техніки та їх метрологічні характеристики, детально розглянуто питання теорії похибок вимірювань і опрацювання результатів вимірювань, висвітлені питання метрологічної повірки засобів вимірювань електричних величин, а також розглянуті методи і засоби вимірювань електричних, магнітних і неелектричних величин.

Конспект лекцій призначений для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© Нестерчук Д.М.

© «Таврійський державний агротехнологічний університет», 2020

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Передмова | 6 |
| Тема 1. Класифікація вимірювань, методів та засобів вимірювань | 7 |
| 1.1 Основні терміни в галузі метрологічної діяльності | 7 |
| 1.2 Фізична величина, її види та систематизація | 12 |
| 1.3 Вимірювання як процес отримання кількісної інформації про вимірювальну величину | 16 |
| 1.4 Загальна класифікація вимірювань. | 18 |
| 1.5 Принципи і методи вимірювань | 22 |
| 1.6 Класифікація засобів вимірювань за метрологічними характеристиками та принципи маркування приладів | 24 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 1 | 30 |
| Список літератури | 31 |
| Тема 2. Засоби вимірювань | 32 |
| 2.1 Засоби вимірювань, їх види та класифікаційні ознаки | 32 |
| 2.2 Структурні схеми вимірювальних приладів та систем | 35 |
| 2.3 Вимірювальні прилади: аналогові та цифрові прилади | 38 |
| 2.4 Характеристики засобів вимірювальної техніки | 40 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 2 | 48 |
| Список літератури | 49 |
| Тема 3. Метрологічна повірка засобів вимірювальної техніки | 50 |
| 3.1 Мета і види метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки | 50 |
| 3.2 Методи метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки | 51 |
| 3.3 Метрологічна повірка приладів прямого перетворення | 55 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 3 | 60 |
| Список літератури | 61 |
| Тема 4. Похибки вимірювань | 62 |
| 4.1 Фактори, які впливають на процес формування похибок вимірювань | 62 |
| 4.2 Класифікація похибок вимірювань | 63 |
| 4.3 Систематична та випадкова похибки | 67 |
| 4.4 Виявлення та виключення систематичних похибок | 69 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 4 | 71 |
| Список літератури | 71 |
| Тема 5. Вимірювальні перетворювачі, електромеханічні вимірювальні прилади, вимірювальні мости та компенсатори (частина 1) | 72 |
| 5.1 Вимірювальні перетворювачі електричних величин | 72 |
| 5.1.1 Резистивні перетворювачі | 72 |
| 5.1.2 Подільники напруги | 76 |
| 5.1.3 Вимірювальні трансформатори струму та напруги | 80 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 5 (частина 1) | 85 |

| | |
|--|-----|
| Тема 5. Вимірювальні перетворювачі, електромеханічні вимірювальні прилади, вимірювальні мости та компенсатори (частина 2) | 87 |
| 5.2 Електромеханічні вимірювальні прилади | 87 |
| 5.2.1 Магнітоелектричні вимірювальні прилади | 89 |
| 5.2.2 Електромагнітні вимірювальні прилади | 95 |
| 5.2.3 Електродинамічні та феродинамічні вимірювальні прилади | 98 |
| 5.2.4 Електростатичні вимірювальні прилади | 107 |
| 5.2.5 Індукційні вимірювальні прилади | 109 |
| 5.3 Вимірювальні мости та вимірювальні компенсатори | 113 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 5 (частина 2) | 129 |
| Список літератури | 130 |
| | |
| Тема 6. Цифрові вимірювальні прилади | 131 |
| 6.1 Загальні відомості. Класифікація цифрових вимірювальних приладів | 131 |
| 6.2 Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) | 133 |
| 6.3 Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) | 137 |
| 6.4 Цифрові прилади для вимірювання електричних величин | 140 |
| 6.5 Мікропроцесорні цифрові вимірювальні прилади | 142 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 6 | 145 |
| Список літератури | 146 |
| | |
| Тема 7. Вимірювання електричних величин (частина 1) | 147 |
| 7.1 Загальні положення вимірювань електричних величин | 147 |
| 7.2 Вимірювання струму і напруги. Схеми вимірювань | 150 |
| 7.3 Вимірювання потужності. Схеми вимірювань | 161 |
| 7.4 Вимірювання електричної енергії. Схеми вимірювань | 170 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 7 (частина 1) | 173 |
| | |
| Тема 7. Вимірювання електричних величин (частина 2) | 174 |
| 7.5 Вимірювання коефіцієнта потужності. Схеми вимірювань | 174 |
| 7.6 Вимірювання частоти. Схеми вимірювання | 181 |
| 7.7 Вимірювання електричного опору в колах постійного струму. Схеми вимірювання | 186 |
| 7.8 Вимірювання параметрів елементів електричних кіл змінного струму | 191 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 7 (частина 2) | 201 |
| Список літератури для вивчення теми 7 (частина 2) | 201 |
| | |
| Тема 8. Вимірювання магнітних величин електричними методами | 203 |
| 8.1 Загальні положення вимірювань | 203 |
| 8.2 Вимірювальні перетворювачі магнітних величин | 207 |
| 8.3 Вимірювання магнітного потоку | 212 |
| 8.4 Вимірювання магнітної індукції та напруженості магнітного поля | 214 |

| | |
|--|-----|
| 8.5 Вимірювання феромагнітних втрат | 216 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 8 | 217 |
| Список літератури | 218 |
| Тема 9. Вимірювання неелектричних величин неелектричними методами | 219 |
| 9.1 Загальні положення вимірювань | 219 |
| 9.2 Параметричні вимірювальні перетворювачі: резистивні; ємнісні; індуктивні перетворювачі | 221 |
| 9.3 Генераторні вимірювальні перетворювачі: індукційні; п'єзоелектричні; трансформаторні; магнітопружні; електретні; термоелектричні; фотоелектричні перетворювачі | 230 |
| 9.4 Методи та засоби вимірювання температури | 236 |
| 9.5 Методи та засоби вимірювання рівня рідин | 245 |
| Контрольні запитання при вивченні теми 9 | 254 |
| Список літератури | 255 |

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології» (КВПзОМ) - це навчальна дисципліна, яка надає здобувачам вищої освіти здатність вирішувати комплексні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з проблемами метрології та електричних вимірювань.

Метою навчальної дисципліни КВПзОМ є формування знань та вмінь фахівців з метрології для вирішування науково-теоретичних проблем вимірювальної техніки.

Науковою основою навчальної дисципліни є метрологія та теорія інформації. Технічною базою електричних вимірювань служать електричні засоби вимірюваної техніки.

Завданнями дисципліни є: вивчення основних понять метрології як науки та їх означення; ознайомлення з загальними відомостями про метрологію як наукову основу сучасної вимірювальної техніки; ознайомлення з загальними положеннями та методологією державної метрологічної атестації засобів вимірювань; вивчення теорії похибок вимірювань та опрацювання результатів вимірювань; вивчення основи теорії та принципів побудови засобів електровимірювальної техніки, їх технічні та метрологічні характеристики; вивчення методів вимірювань та засобів вимірювальної техніки величин: електричних, магнітних та неелектричних.

Матеріал конспекту лекцій орієнтований для здобувачів вищої освіти зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 12 «Електрична інженерія».

Під час підготовки матеріалів конспекту лекцій максимально враховані та використані, як традиції й багаторічний досвід викладання дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології» на кафедрі «Електротехніка і електромеханіка імені професора В.В.Овчарова» в ТДАТУ, так і тенденції досягнень й розвитку сучасної метрології, як науки, так й приладобудівної галузі в Україні.

ТЕМА 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ВИМІРЮВАНЬ, МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ

План лекції

- 1.1 Основні терміни в галузі метрологічної діяльності
- 1.2 Фізична величина, її види та систематизація
- 1.3 Вимірювання як процес отримання кількісної інформації про вимірювальну величину
- 1.4 Загальна класифікація вимірювань. Принципи і методи вимірювань
- 1.5 Класифікація засобів вимірювань за метрологічними характеристиками та принципи маркування приладів

1.1 Основні терміни в галузі метрологічної діяльності

Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність» регулюються документи про метрологію та метрологічну діяльність, відносини у сфері метрології та метрологічної діяльності. Метрологія відрізняється від інших природничих наук тим, що її фундаментальні положення приймаються за угодами, а не диктуються об'єктивними закономірностями. Це підкреслює наявність так званої **законодавчої метрології** – частини метрології, що містить положення, правила, вимоги та норми, які регулюються і контролюються державою для забезпечення єдності вимірювань. Метрологія є **теоретичною основою** вимірювальної техніки, одного з основних факторів технічного прогресу в усіх галузях діяльності людини. **Організаційною основою** метрології є метрологічна служба України. **Нормативною основою** метрології є державні стандарти, відповідні нормативні документи Держстандарту України, методичні вказівки та рекомендації.

Метрологія, як наука зародилась задовго до нашої ери, а саме термін «метрологія» утворений із двох грецьких слів «метра» – міра і «логос» – вчення. Тому то у дослівному перекладі «метрологія» – це вчення про міри. У сучасному розумінні «метрологія» – це наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності. На практиці застосовується також скорочене означення: «метрологія» – це наука про вимірювання. Основними термінами, якими оперує метрологія є фізична величина, одиниця фізичної величини, передавання розмірів фізичної величини, засоби вимірювальної техніки, метод вимірювання, методика вимірювання, результат вимірювання, похибка вимірювання, метрологічне забезпечення вимірювань, метрологічна служба, метрологічна повірка та атестація засобів вимірювальної

техніки. Важливими суб'єктами метрології, як науки, є предмет її вивчення, а також методи і засоби метрології.

Предмет метрології – це отримання кількісної та якісної інформації про властивості фізичних об'єктів і процесів, встановлення та застосування наукових організаційних основ, розроблення технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності й необхідної точності вимірювань.

Методи метрології – це сукупність фізичних і математичних методів, які використовуються для отримання вимірювальної інформації. До методів метрології належать: планування та організація вимірювального експерименту, методи і методики вимірювань, методи відтворення, зберігання та передавання одиниць фізичних величин, методи вимірювальних перетворень сигналів, опрацювання результатів вимірювань.

Засоби метрології – це сукупність засобів вимірювальної техніки, які застосовуються для підготовки та здійснення експерименту, а також системи організації метрологічного контролю і нагляду за засобами вимірювальної техніки.

До засобів метрології належать:

- еталони одиниць фізичних величин;
- стандартні зразки складу і властивостей речовин та матеріалів;
- робочі засоби вимірювальної техніки;
- система метрологічного контролю і нагляду за засобами вимірювальної техніки під час їх виробництва, застосування та ремонту.

Як наука про вимірювання, метрологія є частиною технічної фізики, мета якої – це вирішення науково-теоретичної проблеми вимірювальної техніки.

Розвиваючись швидкими темпами, метрологія ділиться на ряд самостійних розділів: теорія вимірювань; теорія похибок; інформаційна теорія вимірювань; теорія інформаційно-вимірювальних систем; статистичні вимірювання; вимірювання електричних величин; вимірювання магнітних величин; вимірювання неелектричних величин.

Вимірювальна техніка є одним із головних факторів технічного прогресу, і її рівень значною мірою визначає загальний рівень розвитку науки і техніки. Особлива роль належить електровимірювальній техніці, яка дозволяє використовувати новітні досягнення електротехніки, електроніки, обчислювальної техніки і автоматики для вирішення складних науково-технічних завдань.

Методи вимірювання електричних величин застосовуються також для вимірювання неелектричних і магнітних величин. Засоби вимірювання електричних та неелектричних величин застосовуються не тільки для отримання вимірювальної інформації, але і для здійснення контролю за станом параметрів різноманітних матеріальних об'єктів.

Однією з найважливіших характеристик вимірювань є точність, яка характеризує міру відповідності наукового знання про досліджувані об'єкти теорії, сформульованого з використанням кількісних відношень, що отримані в процесі вимірювального експерименту.

Тому точність на кожному етапі розвитку науки і техніки є кінцевою. Прагнучи до пізнання світу та підвищення продуктивності праці, людина в процесі накопичення знань та досвіду розробляє методи пізнання – найбільш ефективні засоби одержання нових знань.

Вимірювальна інформація – одна із складових частин пізнання людиною матеріального світу за допомогою експериментальних методів пізнання. Експериментальна інформація безперервно вдосконалюється у процесі покращення вимірювального експерименту. При цьому відбуваються постійне уточнення вимірювальної інформації, вивільнення її від супутніх похибок і наближення до абсолютної істини. В результаті аналізування отриманої вимірювальної інформації людина пізнає навколишнє середовище.

До **методів експериментальної інформатики** відносять: сприйняття, порівняння, відтворення, спостереження, контроль, вимірювання, розпізнавання образів, діагностику, ідентифікацію, випробування та експериментальні дослідження.

Сприйняття – це відображення найпростіших характеристик довколишнього середовища органами почуття людини або спеціальними технічними засобами (сенсорами, індикаторами) – сигналами, зручними для подальшого використання.

Порівняння – це відображення подібності чи відмінності об'єктів логічним висновком. Відомо, що більшість матеріальних об'єктів виявляють себе одночасно у двох відношеннях, а саме еквівалентності і порядку. Відповідно, і порівняння об'єктів здійснюється за еквівалентністю та за інтенсивністю, тобто за розміром.

Відтворення у метрології – це створення матеріальних об'єктів, що характеризуються фізичною величиною наперед заданого значення за допомогою спеціального технічного засобу, який називають **мірою**.

Спостереження – це відображення властивості, залежності, стану або ситуації словесним чи графічним описом. Спостереження є таким методом пізнання, який здійснюється за допомогою як органів почуття людини, так і спеціальних технічних засобів. Спостереження – це складова частина всіх експериментальних методів пізнання. Як метод пізнання спостереження має задовольняти таким основним вимогам: планомірність, цілеспрямованість й систематичність.

Вимірювання – це відображення вимірюваних величин їхніми значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірювання є комплексною інформаційною процедурою, що ґрунтується на використанні щонайменше двох методів пізнання: відтворення і порівняння.

Контроль – це відображення відповідності між станом об'єкта і заданою нормою відповідним висновком (придатний чи непридатний). В техніці переважає контроль фізичних величин та параметрів процесів. Контроль параметрів – це відображення співвідношення між контрольованим параметром та нормою.

Ідентифікація – це відображення залежності між величинами, що характеризують матеріальний об'єкт, математичною або логічною моделлю. Ідентифікацію розпочинають із визначення типу моделі об'єкта, що відображає залежність між його параметрами, після чого визначають основні параметри моделі, ступінь, точність і вірогідність оцінки.

Діагностика – це відображення загального стану об'єкта та причин цього стану діагнозом із зазначенням особливостей стану і локалізацією відхилень від норм.

Розпізнавання об'єктів – це відображення даного об'єкта за сукупністю його властивостей одним із класів множини цих об'єктів. Розпізнавання об'єктів проводиться шляхом сприйняття їхніх характеристик, порівняння й аналізу на основі попередньої класифікації даної множини об'єктів.

Випробування – це відображення стану досліджуваного об'єкта під час дії на нього сукупності регламентованих факторів сертифікатом.

Експериментальні дослідження – це відображення складного матеріального об'єкта або ситуації, що характеризується сукупністю взаємопов'язаних величин, системою відповідних моделей. Важливе місце серед експериментальних методів пізнання займають вимірювання, за допомогою яких отримують необхідну кількісну та якісну інформацію. Наявність вимірювальної інформації про об'єкт дослідження дає можливість більш ефективно використовувати усі інші експериментальні методи пізнання – від спостереження до експериментального дослідження.

Існують три основні складові метрології, як науки: *науково-теоретична метрологія, законодавча метрологія та прикладна метрологія*. В таблиці 1.1 наведені завдання та зміст основних складових метрології.

Функції всіх трьох розділів науково-теоретичної, законодавчої та прикладної метрології взаємопов'язані й скеровані на вирішення актуальних проблем забезпечення єдності та потрібної точності вимірювань.

Стандартизація – це діяльність, яка направлена на розробку та встановлення вимог, правил, норм чи характеристик. Мета стандартизації – це досяг-

нення оптимального ступеня впорядкування в будь-якій галузі, результат при цьому – підвищення оптимального ступеня відповідності об'єктів стандартизації їх функціональному призначенню.

Таблиця 1.1 - Завдання та зміст основних складових метрології

| Складова метрології | Завдання та зміст |
|-------------------------------|---|
| Науково-теоретична метрологія | <ul style="list-style-type: none"> - розробка та удосконалення теоретичних основ метрології; - розробка нових принципів та методів вимірювань, проведення фізичних досліджень з метою використання найновіших досягнень науки для створення нових методів вимірювань та засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), підвищення точності вимірювань; - створення та удосконалення наукових основ єдності мір та вимірювань, створення наукових основ державних випробувань вимірювальних засобів, розробка та удосконалення нормативної документації в галузі вимірювальної техніки; - створення та удосконалення наукових основ державної служби стандартних довідкових даних та стандартних зразків, розробка і удосконалення системи збору, апробації, зберігання та поширення стандартних довідкових даних. |
| Законодавча метрологія | <ul style="list-style-type: none"> - узаконення (стандартизація) термінів та їх означень, систем та сукупності одиниць, системи еталонів, мір фізичних величин та ЗВТ; - узаконення класів точності ЗВТ та методик оцінювання їх точності, а також стандартних довідкових даних, методик перевірки та контролю ЗВТ, методик оцінювання відповідності та контролю якості продукції. |
| Прикладна метрологія | <ul style="list-style-type: none"> - організація державної служби єдності мір та вимірювань, організація та здійснення періодичної повірки ЗВТ, які знаходяться в експлуатації, а також здійснення державних випробувань нових ЗВТ, контроль за станом вимірювального господарства підприємств; - організація та налагодження роботи служби контролю за дотриманням стандартів та технічних умов під час виробництва, випробувань, контролю якості та оцінювання відповідності продукції; - організація державної служби стандартних довідкових даних та стандартних зразків, видання офіційних довідників зі значеннями констант та властивостей речовин і матеріалів, виготовлення та випуск стандартних зразків та організація служби їх атестації. |

Взаємозв'язок метрології та стандартизації характеризується тим, що вимірювання, з одного боку, регламентуються різними нормативними документами на засоби вимірювальної техніки та методиками, а, з іншого боку, дотримання вимог нормативних документів забезпечуються методами і засобами вимірювальної техніки, контроль за їх виконанням.

Тому то, метрологія і стандартизація в Україні об'єднані в єдину державну службу під керівництвом спеціально уповноваженого центрального органу виконавчої влади.

Отже, метрологія є науковою основою сучасної вимірювальної техніки, при цьому функції прикладної і законодавчої метрології підпорядковані положенням теоретичної метрології. В свою чергу, положення теоретичної метрології практично перевіряють та реалізують функції прикладної та законодавчої метрології.

1.2 Фізична величина, її види та систематизація

Вимірювання є предметом вивчення метрології. Метрологія, як наука, ґрунтується на системі понять. Поняття – це одиниця думки. Поняття науки – це основа її мови. Вихідним поняттям метрології є поняттям про *фізичну величину*. Згідно з ДСТУ 2681 – 94 *фізична величина* – це якісна властивість об'єкта, що має певний кількісний вміст. Прикладами фізичних величин є маса, довжина, сила електричного струму, електричний опір, ємність, індукція та напруженість магнітного поля, потужність і енергія, частота та період. Фізична величина – це властивість явища чи тіла, яка може бути розрізнена якісно і визначена кількісно. Якщо фізична величина змінюється в часі, то говорять про *фізичний процес*. Наприклад, зміна напруги на затискачах обмотки трансформатора. Якщо фізична величина змінюється лише у просторі, то говорять про *стаціонарне фізичне поле*. Наприклад, напруженість магнітного поля у різних місцях земної кулі. Якщо фізична величина змінюється як у часі, так і в просторі, то говорять про фізичне поле. Прикладом може бути температурне поле в приміщенні, де температура в різних місцях у певний момент часу різна і змінюється упродовж доби.

Рід фізичної величини – це якісна означеність фізичної величини. Розрізняють однорідні та різнорідні фізичні величини. Наприклад, діаметр і висота циліндра – це однорідні величини – величини довжини. Однак маса і об'єм стрижня – це різнорідні величини. Для забезпечення можливості однозначної інтерпретації виразів математики, які описують будь-які взаємозалежності між фізичними величинами під час їх вимірювань, рекомендується застосовувати однакові позначення фізичних величин у різних галузях науки, техніки та у підручниках.

Для позначення фізичних величин використовуються літери латинського та грецького алфавітів. Рекомендовані позначення фізичних величин наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Рекомендовані позначення фізичних величин

| Назва величини | Позначення | Назва величини | Позначення |
|-----------------------------------|----------------|--------------------------------|------------|
| Витрата масова | Q_m, Q | Маса | m |
| Витрата об'ємна | Q_v, Q | Модуль пружності (модуль Юнга) | G |
| В'язкість динамічна | μ, η | Момент інерції | J |
| Густина | ρ, δ | Момент магнітний | p_m |
| Густина електричного струму | J, j, δ | Момент сили | M |
| Довжина | l | Намагніченість | J, M |
| Довжина хвилі | λ | Напруженість магнітного поля | H |
| Енергія | W, E | Напруга електрична | U |
| Ємність електрична | C | Напруженість електричного поля | E |
| Заряд електричний | Q, q | Об'єм | V |
| Індуктивність | L | Опір електричний | R |
| Індуктивність взаємна | M | Опір електричний питомий | ρ |
| Індукція магнітна | B | Освітленість | E |
| Інтенсивність звуку | J | Потік світловий | Φ |
| Кількість речовини | ν | Потік тепловий | Φ |
| Коефіцієнт температуропровідності | a | Потокозчеплення | ψ |
| Коефіцієнт теплопровідності | λ | Потужність | P |
| Концентрація | n | Потенціал | U, ϕ |
| Кут | ϕ, α | Провідність електрична | G |

Продовження таблиці 1.2

| Назва величини | Позначення | Назва величини | Позначення |
|-------------------------------|----------------|----------------------------|-----------------|
| Момент електричний | p_e | Період | T |
| Потік випромінювання | F, Φ, P | Стала газова | R |
| Потік магнітний | Φ | Стала електрична | ε_0 |
| Прискорення вільного падіння | g | Стала магнітна | μ_0 |
| Прискорення кутове | ε | Стала часу | τ |
| Провідність електрична питома | ρ, γ | Температура термодинамічна | T |
| Проникність діелектрична | ε | Температура | Θ, t |
| Проникність магнітна | μ | Теплоємність | c |
| Робота | A, W, L | Тиск | p, P |
| Різниця потенціалів (напруга) | U | Фаза | φ |
| Сила струму | I | Час | t |
| Сила | F, f | Частота | f, ν |
| Сила електрорушійна | E | Частота кутова | ω |
| Сила світла | J | Швидкість | V, v |
| Стала Больцмана | k | Яскравість | B |

Кількісною характеристикою фізичної величини є розмір вимірювальної величини. Електричні струми, що протікають в біологічних тканинах живих організмів, при заряді акумулятора і розряді блискавки, відображають одну і ту саму фізичну властивість, але кількісно відрізняються. Тобто **розмір величини** відображає об'єктивну кількість певної властивості, яка притаманна конкретному об'єкту незалежно від того, вимірюється ця величина чи ні.

Під час вимірювань знаходять експериментальну наближену оцінку розміру – значення величини. **Значення вимірюваної величини X** – це експериментальна оцінка її розміру x у вигляді деякої кількості N_x значень однорідної з нею величини q , яка має назву **одиниця вимірювання**, яка дорівнює

$$x = N_{xq} \cdot q, \quad (1.1)$$

де N_{xq} – неіменоване число, яке має назву *числове значення вимірюваної величини*.

Наприклад, напруга акумулятора дорівнює 12 вольт, тобто число 12 є числовим значенням напруги при прийнятому розмірі одиниці напруги – Вольт. Отже, *значення величини* містить як *числове значення*, так й *одиницю вимірювання*, тобто є вже іменованим числом.

Основною ознакою систематизації є належність величин до однієї з трьох основних сторін явища – *речової, енергетичної та інформаційної*.

Вимірювання величин *речової групи* необхідне для вивчення фізичних і фізико-хімічних властивостей матеріалів, речовин і їх складу для керування технологічними процесами виробництва.

Вимірювання величин *енергетичної групи* необхідне для вивчення та керування процесами перетворення, передавання і використання енергії.

Величини *інформаційної групи* відображають динамічні та статичні характеристики процесів. Вимірювання даних величин необхідне для якісного і ефективного керування.

За родом величини всі фізичні величини поділяють на *електричні, неелектричні та магнітні*. Число електричних та магнітних фізичних величин, що підлягають вимірюванню, не перевищує 100. Число неелектричних величин, які вимірюються і які необхідно вимірювати, з кожним роком зростає і перевищує 4000. Це свідчить про пріоритетний розвиток приладобудування, засобів технологічного контролю, засобів вимірювань і контролю навколишнього середовища, а також засобів контролю речовин, матеріалів і виробів.

За числом значень, за яких може бути вимірювана величина на скінченному проміжку часу, фізичні величини поділяються на *неперервні (аналогові)* й *дискретні*.

Аналогова фізична величина – це величина, яка на кінцевому часовому інтервалі в заданому діапазоні набуває нескінченної кількості значень.

Квантова фізична величина – це величина, що поділена на рівні за розміром частини – кванти.

За наявністю розмірності розрізняють *розмірні* та *безрозмірні* фізичні величини.

Розмірна фізична величина – це величина, в розмірності якої розмірність хоча б однієї з основних величин піднесена до степеня, що не дорівнює нулю.

Безрозмірна фізична величина, в розмірності якої всі степені розмірностей основних величин дорівнюють нулю.

1.3 Вимірювання як процес отримання кількісної інформації про вимірювальну величину

Вимірювання фізичних величин є одним з найважливіших експериментальних методів пізнання, що ґрунтується на принципі відображення, в якому чітко розрізняється предмет відображення – це фізична величина певного розміру, і результат відображення – це значення фізичної величини.

Вимірювання - це знаходження значення фізичної величини чи її параметра експериментально за допомогою спеціальних технічних засобів, що забезпечують порівняння величини з *одиноцею*, а також, якщо необхідно, за допомогою виконання певних *обчислювальних процедур*.

Суть вимірювання - це порівняння вимірюваної величини з деяким її значенням прийнятим за *одиноцю*. Будь-яке вимірювання здійснюється за допомогою обов'язкового виконання фізичного експерименту, в якому взаємодіють *об'єкт вимірювання* і *засоби вимірювальної техніки*, що мають *нормовані метрологічні властивості*.

Основні компоненти вимірювального процесу наведені на рисунку 1.1.

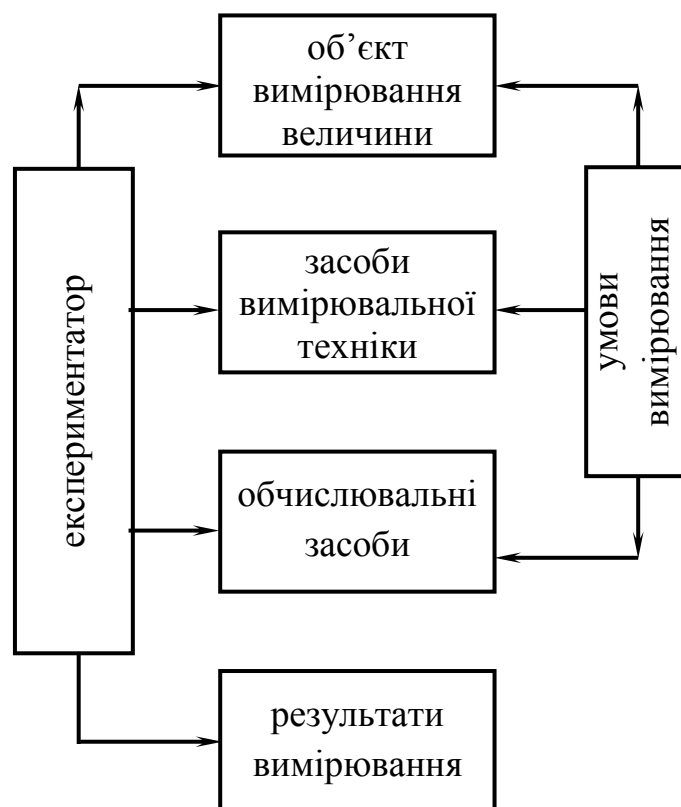


Рисунок 1.1 - Основні компоненти вимірювального процесу

Об'єктами вимірювань можуть бути фізичні тіла та їх системи, речовини та їх стани, а також пов'язані з ними фізичні явища. Так, об'єктом вимірювання може бути електричний трансформатор, що має декілька обмоток на осерді (система фізичних тіл), а також електромагнітне поле, яке створюється стру-

мами, що протікають по обмоткам, (пов'язане з системою тіл явище). Осердя трансформатора характеризується геометричними розмірами, масою, магнітною проникністю, механічними і тепловими властивостями. Кожна з обмоток трансформатора має електричний опір, реактивний опір на певній частоті, опір ізоляції, об'єм, масу.

Отже, кожен з об'єктів вимірювання має різноманітні властивості чи якості, які мають певний кількісний вміст і є *фізичною величиною*, яку можна вимірювати.

Основними операціями будь-якого вимірювання є відтворення розміру одиниці та порівняння з ним розміру вимірювальної величини. Розмір вимірювальної величини може істотно відрізнятись від розміру одиниці, тоді для можливості їх порівняння застосовують *масштабне перетворення* вимірюваної величини чи одиниці. Можуть виникати технічні проблеми точного відтворення розміру одиниці певної фізичної величини, тоді перед операцією порівняння виконують перетворення фізичної величини в іншу величину, для якої відтворення одиниці є простішим. Часто на практиці для отримання результату вимірювання необхідно здійснити *обчислення*.

Отже, перелічені операції згідно ДСТУ 2681-94 можуть бути виконані окремими пристроями, а саме, *вимірювальними пристроями*, до яких належать *міри, вимірювальні перетворювачі, компаратори та обчислювальні компоненти*.

Пристрої, які реалізовані у формі комплексних пристроїв, мають назву *вимірювальні засоби*, до яких належать *вимірювальні прилади, вимірювальні системи, вимірювальні канали, вимірювальні системи та вимірювальні установки*. У засобах вимірювань реалізовані всі необхідні вимірювальні операції, тобто за їх допомогою безпосередньо отримують результат вимірювання.

Вимірювальні пристрої та засоби вимірювань об'єднують у так звані *засоби вимірювальної техніки (ЗВТ)*, які обов'язково мають *нормовані метрологічні властивості*, а саме, діапазон вимірювань, клас точності, швидкодія, чутливість та умови застосування. Ці властивості (характеристики) вказують у нормативно-технічній документації на засіб. ЗВТ використовують в певних умовах, серед них напруга та частота живлення, температура довкілля, тиск та вологість, напруженість магнітного та електростатичного поля, інтенсивність електромагнітного поля, рівень радіації та механічних вібрацій, стрясань та ударів. Під час вимірювання необхідно контролювати і враховувати усі величини, так як вони не є вимірюваними, однак такі, що впливають на роботу ЗВТ, змінюючи їх характеристики та результати вимірювань.

Існує суб'єкт вимірювання – це *експериментатор*, який може брати безпосередню участь у виконанні вимірювального експерименту. В інших випадках, наприклад, в системах автоматичного керування технологічними процедурами, вимірювальний процес здійснюється автоматично і експериментатор виконує функцію нагляду. Від експериментатора залежить якість виконаного вимірювального експерименту і його результатів. Якщо не вірно записані числові значення результатів чи одиниць, експериментатор може бути причиною появи *промахів*, тобто завідомо неправильних відхилень результатів від істинних значень величин. Часто від вміння і досвіду експериментатора залежить успіх та якість виконання вимірювань.

1.4 Загальна класифікація вимірювань.

Фізичні величини та залежності між ними є найбільш поширеними характеристиками матеріальних об'єктів та процесів. Як було зазначено вище, вимірювання здійснюється за допомогою обов'язкового виконання фізичного експерименту, в якому взаємодіють об'єкт вимірювання і засоби вимірювальної техніки, а також здійснюються певні обчислювальні процедури над отриманими результатами. На рисунку 1.2 наведена класифікація вимірювань.

В таблиці 1.3 наведені ознаки вимірювань.

За відсутністю чи наявності в процедурі вимірювання перетворення роду вимірюваної величини та обчислення її значення за відомими фізичними залежностями вимірювання класифікують на *прямі* та *непрямі*.

Сутність *прямого вимірювання* полягає у вимірюванні однієї величини, значення якої знаходить експериментатор безпосередньо без перетворення її роду та використання відомих залежностей.

Пряме вимірювання – це вимірювання однієї величини, в якому її значення одержують безпосередньо за показом відповідного приладу X_n , без необхідних для знаходження значення вимірюваної величини додаткових обчислень

$$x = X_n. \quad (1.2)$$

Приклади прямих вимірювань: вимірювання сили струму амперметром, вимірювання температури термометром, вимірювання інтервалу часу годинником, вимірювання електричного опору омметром.

Значення вимірюваної величини вважається знайденим прямим вимірюванням, коли шкала приладу проградуєрована у відповідних значеннях вимірюваної величини. Вимірювання вважається також прямим і тоді, коли результат знаходять, опрацьовуючи результати спостережень без перетворення роду величини.

Сутність непрямого вимірювання полягає у знаходженні однієї чи декількох вимірюваних величин після перетворення роду величини чи обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо. Непрямі вимірювання можуть бути *опосередкованими, сукупними та сумісними*.

Таблиця 1.3 - Ознаки видів вимірювань

| Вид вимірювання | Ознаки вимірювань |
|--|--|
| Разові вимірювання | це вимірювання, які виконують у разі стабільних показів засобів вимірювань при наведених похибках. Необхідно здійснити 3...5 спостережень з метою переконання у стабільності показань. |
| Багаторазові вимірювання | це вимірювання, які здійснюють, коли показання засобів вимірювань є нестабільними, а розходження між ними перевищують допустимі границі, що встановлені згідно класу точності та метрологічних характеристик. Під час проведення таких вимірювань їх кількість становить від 3...5 до мільйонів. За середніми значеннями результатів забезпечується підвищення точності вимірювань завдяки взаємній компенсації складових змінних похибок. |
| Контактні вимірювання | це вимірювання, при яких засіб вимірювань має безпосередній механічний контакт з досліджуваним об'єктом. Наприклад, для вимірювання струму амперметр вмикається у вимірювальне коло, а термоелектричний перетворювач розміщується у досліджуване середовище при вимірюванні його температури. |
| Безконтактна (дистанційні) вимірювання | це вимірювання, під час яких не відбувається безпосереднього механічного контакту ЗВТ з досліджуваним об'єктом, а вимірювальна інформація про стан об'єкта одержується за допомогою використання різних випромінювань: оптичних, акустичних, теплових, іонізаційних, електромагнітних. |
| Статичні вимірювання | це вимірювання величини, яку можна вважати незмінною за час вимірювання, або характеристики зміни величини відповідають динамічним властивостям ЗВТ. Наприклад, вимірювання діаметра, довжини, маси стрижня. |
| Динамічні вимірювання | це вимірювання величини, яка змінюється протягом вимірювального експерименту або характеристики зміни цієї величини не відповідають динамічним властивостям ЗВТ. Наприклад, вимірювання температури нагрівального елемента або вимірювання сталої температури відразу після розміщення терморезистивного перетворювача у досліджуване середовище, при цьому опір перетворювача ще не досяг усталеного значення. |

Продовження таблиці 1.3

| Вид вимірювання | Ознаки вимірювань |
|--|---|
| Технічні вимірювання | це типові вимірювання на об'єктах із застосуванням наперед заданих ЗВТ, вимірювальних схем відповідно до конкретної методики вимірювань. Як правило, у таких вимірюваннях спеціально не оцінюються характеристики точності результатів, оскільки вони закладені ще на етапі планування таких вимірювань у відповідній метрологічній установі, з урахуванням використовуваних ЗВТ та умов вимірювань. Наприклад, вимірювання параметрів генератора електричної станції (лінійні та фазові напруги, струми, частота, потужність) під час його роботи. |
| Лабораторні (науково-дослідні) вимірювання | Вимірювання для дослідження фізичних закономірностей в різних об'єктах довкілля, зокрема, створюючи нові технології і засоби вимірювальної техніки. Переважно це не типові вимірювання, за яких необхідно спеціально планувати вимірювальний експеримент, розробляти вимірювальну схему, обґрунтовувати вибір ЗВТ (зокрема, їх характеристики точності), забезпечувати умови вимірювань з обов'язковим оцінюванням їх точності. |
| Метрологічні (еталонні) вимірювання | це вимірювання у метрологічних установках під час досліджень ЗВТ, створення нових методик вимірювань, під час метрологічних випробувань, контролю, атестації та експертизи при передаваннях розмірів одиниць фізичних величин. Такі вимірювання здійснюються відповідно до суворо регламентованих рекомендацій, сформульованих у відповідних нормативних документах, що часто мають статус державних стандартів. |

Опосередковане вимірювання – це непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленнями за результатами вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функціональною залежністю. Характерним для опосередкованих вимірювань є функціональне вимірювальне перетворення, яке здійснюється або шляхом фізичного вимірювального перетворення, або шляхом числового вимірювального перетворення. Наприклад, при опосередкованих вимірюваннях потужності постійного струму її визначають чи на основі прямих вимірювань струму та напруги за формулою $P = U \cdot I$, чи на основі фізичного вимірювального перетворення добутку $U \cdot I$ в іншу фізичну величину.

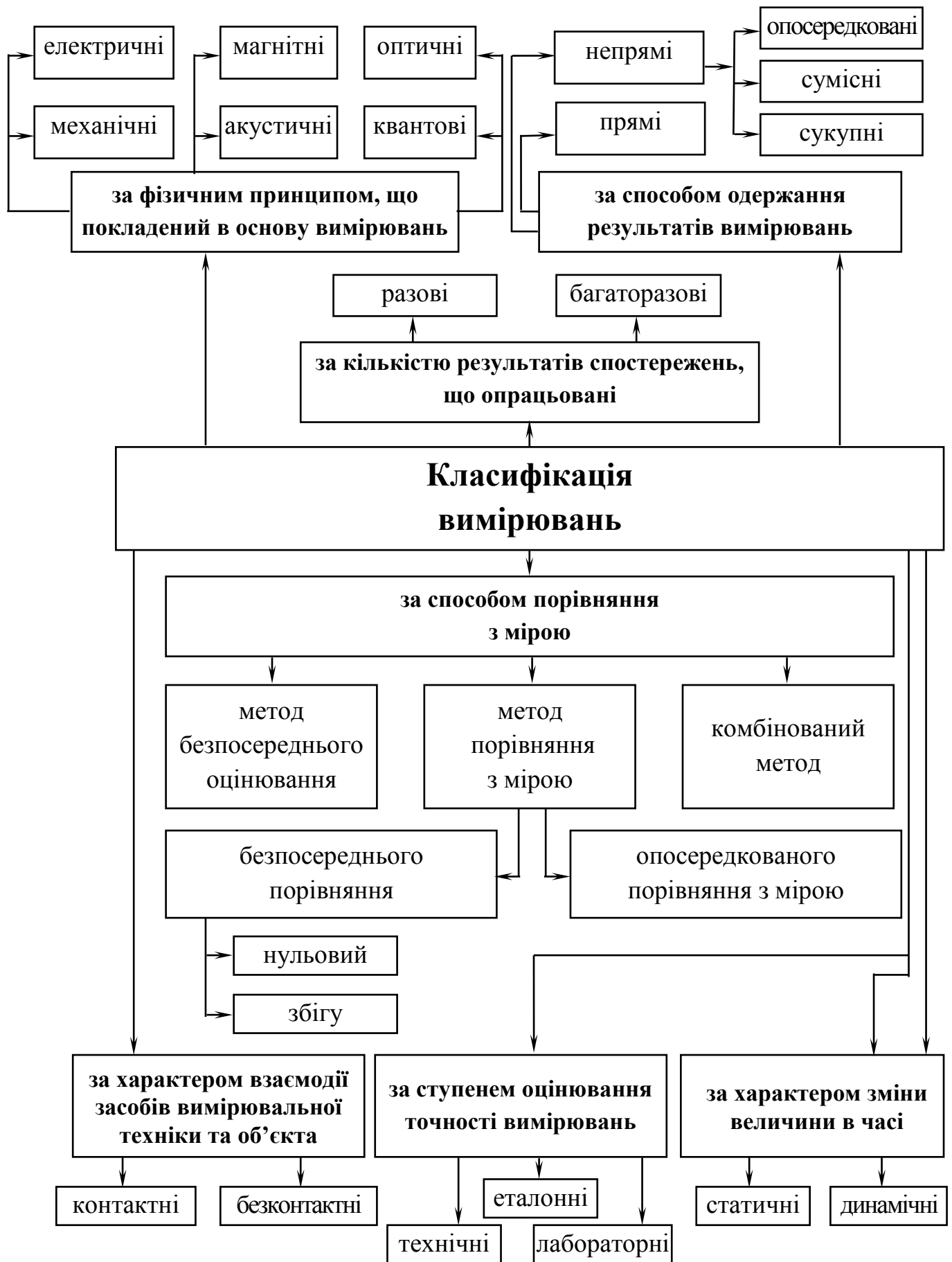


Рисунок 1.2 - Класифікація вимірювань

Сукупне вимірювання – це непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних однорідних фізичних величин отримують розв’язанням рівнянь, що пов’язують різні сполучення цих величин, які вимірюються прямо чи опосередковано. Метою сукупних вимірювань є знаходження шляхом числових вимірювальних перетворень значень декількох фізичних величин за неможливості їх окремого прямого вимірювання. При цьому завдяки усередненню досягається ще й зменшення випадкової похибки вимірювання. Прикладом сукупних вимірювань може бути вимірювання опору кожного з двох резисторів R_1 , R_2 , які з’єднані послідовно та паралельно. В результаті прямого вимірювання омметром послідовно з’єднаних опорів еквівалентний опір дорівнює $R_{\text{послідовно}} = R_1 + R_2$, а сумарна провідність паралельно з’єднаних резисторів становить $1/R_{\text{паралельно}} = 1/R_1 + 1/R_2$. Із системи з двох рівнянь із двома невідомими обчислюються невідомі значення опорів R_1 , R_2 , які виміряні сукупно.

Сумісне вимірювання – це непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв’язанням рівнянь, які пов’язують їх з іншими фізичними величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано.

1.5 Принцип і методи вимірювань

Принцип вимірювання – це фізичний закон (ефект, явище), на якому ґрунтується вимірювання, це наукова основа вимірювання.

Метод вимірювання – це загальна логічна послідовність операцій із застосуванням засобів вимірювальної техніки, яка виконується під час здійснення вимірювань за певним принципом. Конкретна назва методу може залежати від принципу вимірювання. Так, при вимірюванні електричного опору за методом амперметра і вольтметра напруга вимірюється вольтметром, сила струму – амперметра, а результат вимірювання визначається згідно закону Ома.

Процедура вимірювання – це послідовність вимірювальних операцій, що забезпечує вимірювання згідно з обраним методом.

Методика виконання вимірювання – це сукупність процедур і правил, дотримання яких забезпечує одержання результатів з потрібною точністю.

Кожне вимірювання передбачає порівняння фізичної величини з одиницею, яка відтворюється мірою. У кожному вимірюванні явно чи неявно присутня міра, і, тому то в залежності від наявності при вимірюванні міри як окремо засобу вимірювальної техніки, існують три методи вимірювань:

- методи безпосереднього оцінювання;
- методи порівняння з мірою;

- комбіновані методи.

Методи безпосереднього оцінювання – це методи вимірювань, що ґрунтуються на застосуванні засобів вимірювань (приладів, систем, каналів чи установок) і, якщо необхідно, вимірвальних перетворювачів, а значення вимірюваної величини знаходять за їх показами $x = X_n$. Наприклад, вимірювання активної потужності ватметром. Це метод безпосереднього оцінювання, оскільки за показом ватметра визначається активна потужність електричного кола.

До методів безпосереднього оцінювання належать також вимірювання, у яких разом з вимірвальними приладами використовують вимірвальні перетворювачі, а саме, вимірювання сили струму за допомогою амперметра і вимірвального трансформатора струму, що застосовується для розширення границь вимірювання амперметра, належить до методу безпосереднього оцінювання. Таким же методом безпосереднього оцінювання є вимірювання температури за допомогою термоелектричного перетворювача та вторинного мілівольтметра, якщо шкала останнього проградуєвана в одиницях температури.

Методи порівняння з мірою - це методи, які ґрунтуються на обов'язковому використанні міри та пристрою порівняння (компаратора) як окремих ЗВТ і, якщо необхідно, вимірвальних перетворювачів, а значення вимірюваної величини встановлюють за показами міри при відповідному спрацюванні компаратора.

У процесі вимірювання виконуються завдання різного характеру і складності. Проте підхід до їхнього вирішення має багато спільного і може бути зведений до певного **алгоритму виконання вимірювань**, який складається:

- з постановки вимірвального завдання. При розв'язанні такої проблеми визначається рід вимірюваної величини та діапазон, в якому вона може змінюватись. Правильність формулювання поставленого завдання визначає в кінцевому підсумку якість вимірювань і економічні витрати на їх виконання;
- з вибору методу вимірювання. При виборі методу враховуються методичні похибки існуючих методів вимірювання. За результатами вибору методу вимірювання методична похибка повинна бути меншою за деяку припустиму похибку, це дозволить перейти до розв'язання наступної проблеми;
- з синтезу вимірвальної системи (кола). Один і той самий метод вимірювання може бути реалізований різними способами. Тому важливо правильно вибрати вимірвальну схему і конкретно реалізувати її, з урахуванням необхідних метрологічних характеристик засобів вимірювання;
- з вимірвального експерименту;
- з обробки результатів вимірювання, яка містить:

- *перший етап* - зчитування (зняття) інформації, перетворення її в цифровий код і запис в запам'ятовувальний пристрій мікропроцесора цифрового приладу;

- *другий етап* - статистична обробка результатів спостереження з оцінкою ступеня довіри;

- *третій етап* - інтерпретація результатів, одержаних на другому етапі обробки.

1.6 Класифікація засобів вимірювань за метрологічними характеристиками та принципи маркування приладів

Результати вимірювань повинні мати певну точність та виражатися у узаконених одиницях вимірювань. Точність результатів вимірювань визначається метрологічними характеристиками тих засобів вимірювань, які застосовувались під час вимірювань. В залежності від метрологічних функцій всі засоби вимірювальної техніки поділяються на *державні еталони, робочі ЗВТ та зразкові*.

Державний еталон одиниці вимірювання – це засіб вимірювальної техніки або комплекс засобів, що забезпечує відтворення і (або) зберігання одиниці фізичної величини для передачі її розміру іншим засобам вимірювань, класу точності яких нижче, за офіційно затвердженим порядком.

Робочий засіб вимірювальної техніки – це засіб, який використовується для практичних вимірювань, але не призначений для перевірки інших засобів вимірювань.

Зразковий засіб вимірювання – засіб, який призначений для перевірки інших засобів вимірювань методом порівняння і офіційно затверджений, як зразковий. До зразкових засобів вимірювань належать зразкові речовини і стандартні зразки.


Зразкова речовина – це міра у вигляді речовини з відомими властивостями, які відтворюються, якщо дотримуються умови її виготовлення, що вказані у затвердженій специфікації.

Стандартний зразок – це міра для відтворення одиниць величин, що характеризують властивості або склад речовини і матеріалів.

Маркування електровимірювальних приладів призначене для надання найбільш важливих відомостей про прилад, а саме, про його метрологічні характеристики, тому то при маркуванні на лицеву панель приладу (шкалу) наноситься інформація у вигляді умовних літер або умовних графічних позначень, щоб надавати відомості про прилад у будь-який час.

На шкалі приладу позначаються: марка приладу, заводський номер приладу, скорочене позначення одиниць вимірюваної величини, клас точності при-

ладу, умовне позначення роду струму та системи приладу, умовне позначення напруги випробування ізоляції та нормального положення приладу, а також позначення частоти струму або її меж для приладів змінного струму для кіл з не стандартною частотою струму, при яких гарантується точність показань приладу, ступінь захищеності від впливу магнітних та електричних полів. Крім перелічених, деякі прилади та допоміжні частини мають такі позначення, а саме, схема підключення приладу або допоміжної частини, коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів, опори та номінальні струми додаткових резисторів, номінальні значення струму та падіння напруги шунтів, коефіцієнт потужності.

Допускається у відповідності з технічними умовами ряд позначень наводити в експлуатаційній документації, в такому випадку на приладі повинен бути наведений на шкалі символ  «Увага! Прилад без інструкції не вмикати».

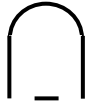
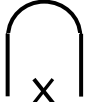
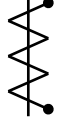
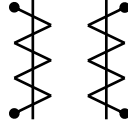
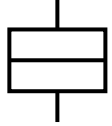
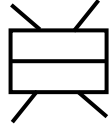
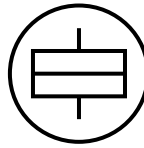

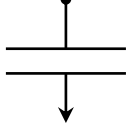
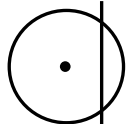
Літера, з якої починається тип приладу, показує спосіб створення обертального моменту електромеханічного вимірювального приладу, визначає його назву: М – магнітоелектричний; Э – електромагнітний; Д – електро– та феродинамічний; И – індукційний; С – електростатичний; В – випрямний; Т – термoeлектричний, Н - самописець, Р – міри та вимірювальні перетворювачі.

В залежності від принципу дії вимірювального механізму, а саме, від принципу перетворення електромагнітної енергії вимірювального сигналу в механічну енергію рухомої частини і виду функції перетворення, електромеханічні аналогові вимірювальні прилади поділяються на такі **системи**: *магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, феродинамічну, електростатичну та індукційну.*

Типи, структури та основні метрологічні характеристики електромеханічних аналогових вимірювальних приладів різних систем наведені в таблиці 1.4.

Умовна літерна позначка приладу за родом вимірюваної величини наноситься на лицьову сторону приладу: на шкалу – таблиця 1.5.

Таблиця 1.4 - Основні умовні позначення на шкалах аналогових приладів

| Назва | Умовне позначення |
|--|---|
| <i>1.Позначення системи вимірювального механізму приладу:</i> | |
| - магнітоелектричний механізм звичайний |  |
| - магнітоелектричний механізм логотричний |  |
| - електромагнітний механізм звичайний |  |
| - електромагнітний механізм логотричний |  |
| - електродинамічний механізм звичайний |  |
| - електродинамічний механізм логотричний |  |
| - феродинамічний механізм звичайний |  |
| - феродинамічний механізм логотричний |  |
| - електростатичний механізм |  |
| - індукційний механізм |  |


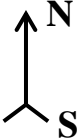

Продовження таблиці 1.4

| Назва | Умовне позначення |
|---|-------------------|
| 2. Позначення роду струму: | |
| - постійний струм | — |
| - змінний однофазний струм | ~ |
| - постійний і змінний струм | ~ — |
| - трифазний змінний струм | ~ ~ ~ |
| - трифазний змінний струм з асиметричним навантаженням | ~ ~ ~ |
| 3. Позначення нормального положення шкали приладу: | |
| - горизонтальне | ┌ |
| - вертикальне | └ |
| - установка шкали приладу під кутом (45...60...75°) | / 45° |
| 4. Екранування та захист: | |
| - електростатичний екран | ○ |
| - магнітний екран | ○ |
| - захист від зовнішніх магнітних полів | □ |
| - захист від зовнішніх електричних полів | □ |

Продовження таблиці 1.4

| Назва | Умовне позначення |
|---|---|
| 5. Позначення класу точності: | |
| - клас точності, який виражений у формі зведеної похибки | 0,5 |
| - клас точності, який виражений у формі відносної похибки |  |
| - клас точності, який виражений у формі зведеної похибки (у відсотках від довжини шкали) |  |
| - клас точності, який виражений у формі зведеної похибки (у відсотках від інтервалу вимірювань) |  |
| 6. Міцність ізоляції вимірювального кола приладу: | |
| - вимірювальне коло приладу ізольоване від корпусу і випробуване під напругою 2,0 кВ |  |
| - вимірювальне коло приладу ізольоване від корпусу і випробуване під напругою 0,5 кВ |  |
| - прилад випробуванню ізоляції не підлягає |  |
| 7. Прилади з перетворювачами струму: | |
| - магнітоелектричний прилад з випрямлячем |  |
| 8. Додаткові елементи вимірювального кола: | |
| - шунт |  |
| - додатковий резистор |  |
| - додаткова індуктивність |  |
| - затискач для заземлення |  |

Продовження таблиці 1.4

| Назва | Умовне позначення |
|--|---|
| 9. Умови експлуатації приладу: | |
| - робота в сухих приміщеннях, що обігріваються | A |
| - робота в закритих приміщеннях при температурі повітря від мінус 20 °С до плюс 50 °С та при вологості до 80 % | Б |
| - робота в закритих приміщеннях при температурі повітря від мінус 40 °С до плюс 60 °С та при вологості до 98 %, морські та польові умови | B |
| - робота в сухому і вологому тропічному кліматі | T |
| 10. Частотний діапазон: | |
| - розширений діапазон частоти струму | <u>35 – 55</u> – 1500 Hz |
| - нормальний діапазон частоти струму | <u>35 – 55</u> |
| - робочий діапазон частоти струму | 35 - 1500 Hz |
| Увага! Прилад без інструкції не вмикати |  |
| Орієнтація приладу в земному магнітному полі |  |
| Обережно! Міцність ізоляції вимірювального кола не відповідає нормам! |  |

Таблиця 1.5 - Умовні літерні позначки приладів за родом вимірюваної величини

| Найменування приладу | Умовна літерна позначка |
|---|---|
| Амперметр | A |
| Вольтметр | V |
| Вольтамперметр | VA |
| Ватметр | W |
| Варметр | Var |
| Мікроамперметр | μ A |
| Міліамперметр | mA |
| Мілівольтметр | mV |
| Омметр | Ω |
| Мегаомметр | M Ω |
| Частотомір | Hz |
| Фазометр: що вимірює зсув фаз, що вимірює коефіцієнт потужності | φ cos φ |
| Лічильник ампер-годин | Ah |
| Лічильник ват-годин | Wh |
| Лічильник вольт-ампер-годинника реактивний | Varh |
| Вольтметр із цифровим відліком |  |
| Амперметр, рухлива частина якого відхиляється в обидва боки від нульової оцінки |  |
| Осцилограф |  |

Контрольні запитання при вивченні теми 1

- 1 Що таке метрологія та предмет метрології?
 - 2 Що таке методи метрології та засоби метрології?
 - 3 Які є основні складові метрології?
 - 4 Які основні задачі та зміст науково-теоретичної метрології?
 - 5 Які основні задачі та зміст законодавчої метрології?
 - 6 Які задачі та зміст практичної метрології?
- 1 Що таке фізична величина?
 - 2 Що таке позначення фізичної величини? Наведіть приклади позначення.
 - 3 Що таке вимірювана величина та розмір фізичної величини?
 - 4 Що таке значення вимірюваної величини та одиниця вимірювання?

- 5 Що таке істинне та дійсне значення фізичної величини?
- 6 Що таке результат вимірювання та вимірювальна інформація?
- 7 Що таке система фізичних величин? Назвіть одиниці системи одиниць.
- 8 Як позначаються одиниці фізичних величин?
- 9 Що таке вимірювання? Які основні існують компоненти вимірювального процесу?
- 10 Які Вам відомі ознаки вимірювань?
- 11 Дати означення методу вимірювань.
- 12 Яке вимірювання є прямим? Навести приклади.
- 13 Яке вимірювання є непрямим? Навести приклади.
- 14 Що таке опосередковане вимірювання? Навести приклади.
- 15 Що таке сумісне вимірювання? Для чого виконуються сумісні вимірювання?
- 16 Що таке сукупні вимірювання? Для чого виконуються сукупні вимірювання?
- 17 Дати означення методу безпосереднього оцінювання.
- 18 Дати означення методу порівняння з мірою.
- 19 Що таке алгоритм вимірювання? Яке призначення алгоритму вимірювання?
- 20 Що таке методика вимірювань? Яке призначення методики вимірювань?
- 21 Охарактеризуйте значущість вимірювань.

Список літератури

1. Нестерчук Д.М. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 256 с.
2. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
3. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
4. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 656 с.

ТЕМА 2. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

План лекції

- 2.1 Засоби вимірювань, їх види та класифікаційні ознаки
- 2.2 Структурні схеми вимірювальних приладів та систем
- 2.3 Вимірювальні прилади: аналогові та цифрові прилади
- 2.4 Характеристики засобів вимірювальної техніки

2.1 Засоби вимірювань, їх види та класифікаційні ознаки

Засіб вимірювальної техніки (ЗВТ) – це технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики. ЗВТ взаємодіє з об'єктами, внаслідок чого на його вході отримують сигнали, які містять інформацію про вимірювану величину. Згідно з ДСТУ 2681-94 до ЗВТ належать **засоби вимірювань (ЗВ)** та **вимірювальні пристрої (ВПП)**.

Засобами вимірювань є засоби, що реалізують процедуру вимірювань, а саме, вимірювальні та реєструвальні прилади, аналогові вимірювальні прилади, цифрові вимірювальні прилади, вимірювальні установки, вимірювальні канали та вимірювальні інформаційні системи. Особливістю засобів вимірювань є те, що з їх допомогою безпосередньо одержують результат вимірювань.

Вимірювальні пристрої – це засоби вимірювальної техніки, в яких виконується лише одна зі складових частин процедури вимірювань – вимірювальна операція. Виділяють такі вимірювальні пристрої: міра, вимірювальний перетворювач, масштабний перетворювач, компаратор та числовий вимірювальний перетворювач (обчислювальний компонент). Особливістю ВПП є те, що вони самостійно не забезпечують одержання результату вимірювання, а лише в сукупності з іншими пристроями та засобами вимірювань.

На рисунку 2.1 наведена узагальнена класифікація засобів вимірювальної техніки.

Міра – це вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) зберігання фізичної величини заданого розміру. На вхід такого пристрою надходить значення відтворюваної величини, тобто число N_X , а на виході – відтворена із заданою точністю величина X_N . Міри поділяються на **еталони**, **зразкові** та **робочі**.

Еталони займають значне місце серед мір, так як мають найвищу точність та здійснюють відтворення та зберігання одиниць фізичних величин з метою передачі їх розміру зразковим мірам.

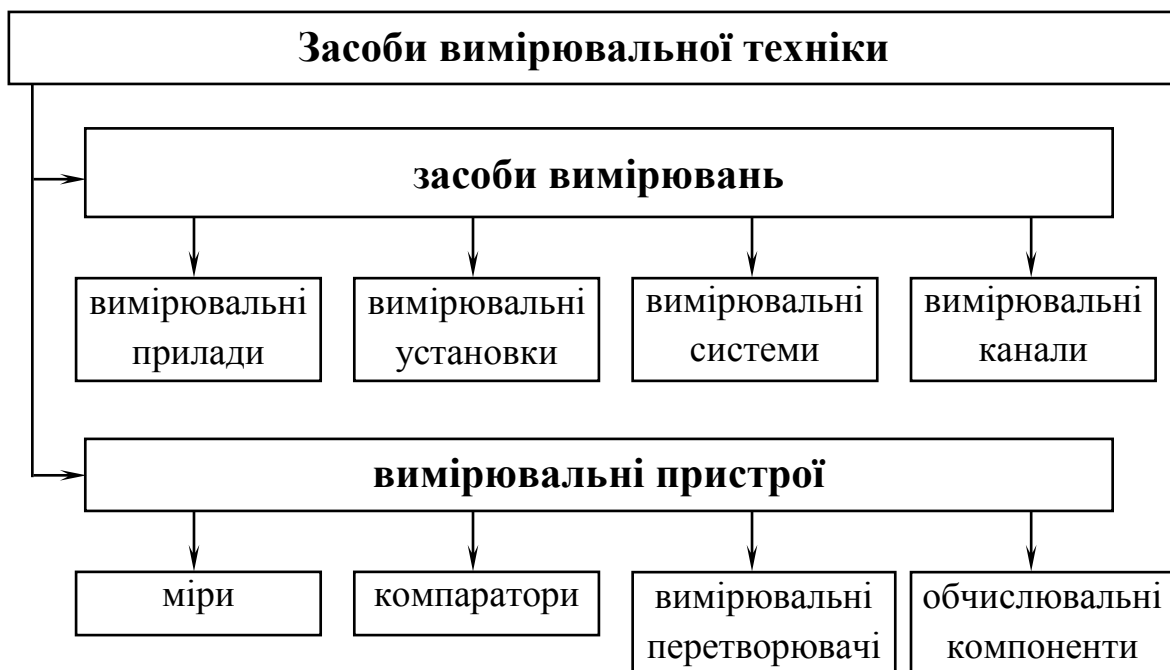


Рисунок 2.1 - Узагальнена класифікація засобів вимірювальної техніки

Зразкові міри передають розмір фізичних величин *робочим мірам*, які призначені для визначення метрологічних характеристик засобів вимірювання.

Крім того, міри поділяються на *однозначні*, які відтворюють фізичну величину у даний момент часу одного розміру, і *багатозначні*, які відтворюють багато значень фізичної величини із заданими у деякому діапазоні.

Вимірювальне перетворення фізичної величини – це вимірювальна операція, під час якої вхідна фізична величина перетворюється у вихідну, функціонально з нею пов’язану. Головна задача вимірювальних перетворень – це одержання вихідних фізичних величин та залежностей між ними, які зручні для порівняння та відтворення. Завдяки вимірювальному перетворенню досягається узгодження роду, меж зміни і частотного діапазону сигналів.

Вимірювальний перетворювач – це вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення. Вимірювальні перетворювачі (ВП) класифікують за такими ознаками:

- за структурою побудови – на *ВП прямого перетворення* (з розімкненою структурою) та *ВП зрівноважувального перетворення* (з замкненою структурою);
- за зміною роду вихідної величини – на *ВП без зміни роду* та *ВП зі зміною роду вихідної величини*, які необхідні у тих випадках, коли для вимірюваної вхідної величини немає міри або компаратора;
- за характером залежності – на *лінійні* та *нелінійні*;
- за кількістю каналів – на *одно-* та *багатоканальні*;
- за видом вихідного сигналу – на *параметричні* та *генераторні*;

- за родом фізичних явищ – на *термоелектричні, оптоелектричні, п'єзоелектричні, електромагнітні та магнітоелектричні*;
- за принципом дії – на *генераторні та параметричні*.

Генераторний ВП – це перетворювач, вихідні сигнали яких мають енергетичні властивості – напруга, струму, магніторушійна та електрорушійна сили.

Параметричні ВП - це перетворювач, в яких зміна вхідного сигналу призводить до зміни їх параметрів – опору, індуктивності, ємності та частоти.

Порівняння – це вимірювальна операція, що полягає у відображенні співвідношення між розмірами двох однорідних фізичних величин відповідальним висновком: більша, менша чи однакова за розміром. Порівняння величин широко використовується в різноманітних процедурах: вимірюванні, контролі, розпізнаванні образів та керуванні.

Компаратор (пристрій порівняння) – це вимірювальний пристрій, що реалізує порівняння однорідних фізичних величин. Компаратори класифікують за такими ознаками:

- за характером дії над сигналами при порівнянні – на компаратори з відніманням сигналів і компаратори з комутацією сигналів;
- за кількістю каналів – на одно- і багатоканальні.

Компаратор має два входи і один вихід. На один хід « X » компаратора подається вимірювана величина X , або вихідна величина вимірювального перетворювача, а на другий хід « X_N » – однорідна величина X_N , яка відтворена мірою. Вихідним сигналом компаратора є логічний сигнал a , який може бути «1», якщо вхідні величини компаратора однакові, та логічний сигнал a буде «0», якщо сигнали різні.

Масштабне вимірювальне перетворення є різновидом вимірювального перетворення, однак через широке застосування та наявність великої кількості ланок, які реалізують лише цю операцію, варто розглянути її окремо.

Масштабне перетворення – це лінійне вимірювальне перетворення вхідної величини без зміни роду. В результаті масштабного перетворення вхідна величина перетворюється в однорідну вихідну, розмір якої пропорційний в k -раз розміру вхідної.

Масштабний перетворювач – це вимірювальний перетворювач, який реалізує масштабне вимірювальне перетворення. Прикладом масштабних вимірювальних перетворювачів є шунти для амперметрів, додаткові резистори для вольтметрів, а також вимірювальні трансформатори струму та напруги.

Числове вимірювальне перетворення – це операція обчислення проміжних результатів вимірювань з метою отримання остаточного результату.

Числовий вимірювальний перетворювач – це вимірювальний пристрій, що є сукупністю засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення і виконує обчислювальні операції під час вимірювань.

Вимірювальний прилад – це засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Засіб вимірювання, в якому візуальний сигнал вимірювальної інформації подається за допомогою шкали та покажчика, має назву **аналоговий вимірювальний прилад**.

Реєструвальний засіб вимірювання – це такий засіб вимірювань, в якому реєструється сигнал вимірювальної інформації. Реєструвальні засоби вимірювання відрізняються від аналогових вимірювальних приладів тим, що замість покажчика в реєструвальних приладах використовується перо з чорнильницею, а носієм вимірювальної інформації є папір та світлочутлива плівка.

Вимірювальний прилад, в якому візуальний сигнал вимірювальної інформації подається у вигляді цифр чи символів на пристрої відліку, має назву **цифровий вимірювальний прилад**.

Вимірювальний канал – це сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів зв'язку та інших пристроїв, призначення яких отримання вимірювальної інформації про одну вимірювальну фізичну величину.

Вимірювальна установка – це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних приладів і пристроїв та інших технічних засобів, призначених для досліджень властивостей зразків матеріалів та метрологічної повірки інших засобів вимірювальної техніки. Об'єктом досліджень у такому разі є засоби вимірювальної техніки (прилади, канали систем, сенсори та міри). Конструктивно установка виконана, переважно, як одне ціле, у вигляді стенда з необхідними пристроями під'єднання досліджуваних зразків, регулювання величин, відображення і документування результатів. Операції з досліджень матеріалів та метрологічної повірки можуть здійснюватись вручну або з різним ступенем автоматизації. Тенденція розвитку ЗВТ є такою, що у перспективі функції установок будуть виконувати контрольно-вимірювальні системи.

Вимірювальна система – це сукупність ЗВТ та засобів контролю, діагностування та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної інформації та інших її видів.

2.2 Структурні схеми вимірювальних приладів та систем

В сучасних засобах вимірювань здійснюються різноманітні та багатоетапні перетворення сигналів вимірювальної інформації. Для аналізу складних перетворень сигналів у засобах вимірювань доцільно перетворення сигналів поділити на низку простих елементарних операцій над вимірювальними сигналами.

Кожній операції відповідає ланка структури, яка графічно ілюструє дану операцію над вхідним X сигналом для отримання вихідного сигналу Y – рисунок 2.2.

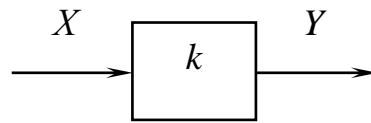


Рисунок 2.2 – Ланка структури засобу вимірювань

Як наслідок, складний, багатоетапний, розгалужений процес перетворення інформації у вимірювальному пристрої зображується графічно у вигляді структурної схеми або структури вимірювального пристрою – рисунок 2.3.

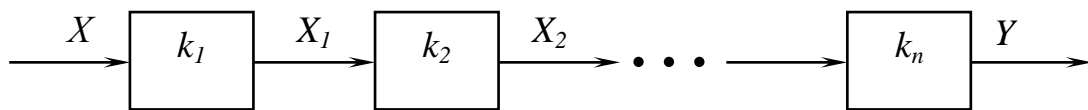


Рисунок 2.3 – Структура вимірювального пристрою (структурна схема)

Структурна схема вимірювального пристрою – це схема, що відображає його основні функціональні частини (структурні елементи) та їх призначення та взаємозв'язки.

За структурою вимірювальні пристрої можна поділити на три типи:

- пристрої прямого перетворення;
- пристрої зрівноважувального (компенсаційного) перетворення;
- пристрої комбінованого перетворення.

Пряме перетворення характеризується тим, що вимірювальна інформація передається тільки в одному напрямі – від входу до виходу без зворотного зв'язку між ними. Сигнал послідовно етап за етапом перетворюється і на виході має форму, яка доступна для безпосереднього сприйняття експериментатором.

Коефіцієнт перетворення засобу вимірювань за такою структурою за умови, що всі перетворювальні елементи мають лінійні функції перетворення, дорівнює добутку коефіцієнтів перетворення окремих перетворювачів структури за формулою

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n. \quad (2.1)$$

Відносна похибка дорівнює сумі відносних похибок від окремих перетворювальних елементів

$$\delta = \frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta k_1}{k_1} + \frac{\Delta k_2}{k_2} + \dots + \frac{\Delta k_n}{k_n}. \quad (2.2)$$

Зрівноважувальне перетворення – це перетворення, при якому вхідна величина врівноважується іншою однойменною величиною.

Існує два види зрівноважувального перетворення:

- слідкувальне (статичне) зрівноважувальне перетворення, структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання наведена на рисунку 2.4.

ділянка прямого перетворення

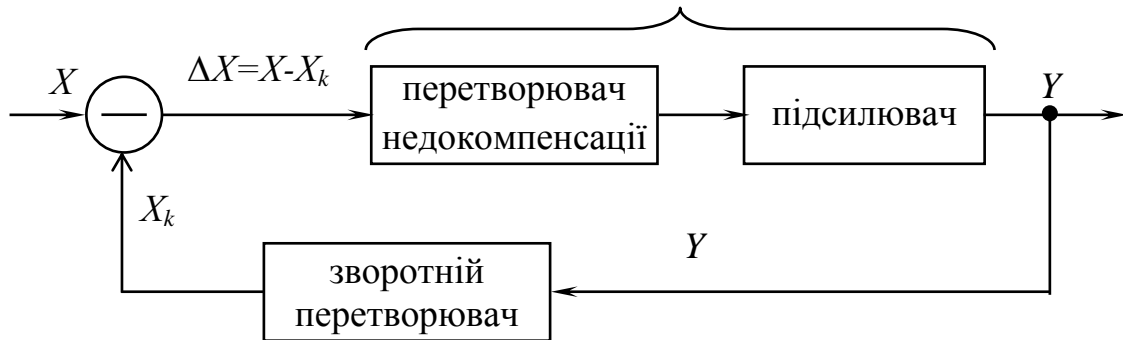


Рисунок 2.4 – Структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання слідкувального (статичного) зрівноважувального перетворення

- астатичне зрівноважування. Структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання наведена на рисунку 2.5.

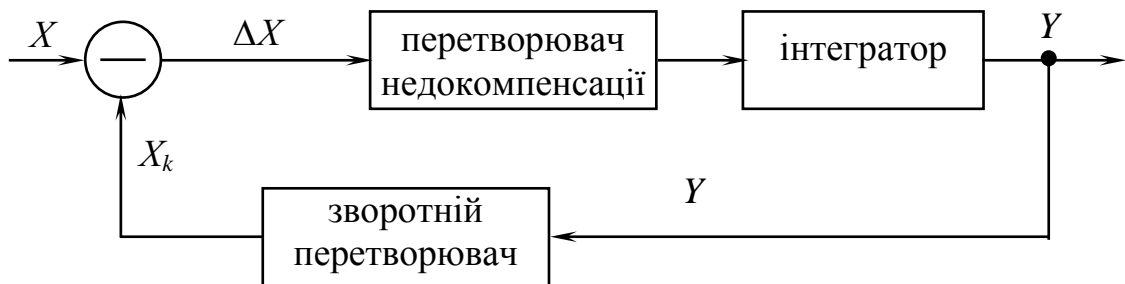


Рисунок 2.5 - Структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання астатичне зрівноважування

- розгортальне зрівноважувальне перетворення. Структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання наведена на рисунку 2.6. При розгортальному зрівноважувальному перетворенні вхідна величина X зрівноважується компенсувальною величиною, а саме $X_k = \beta \cdot Y$ ділянки зворотного перетворення.

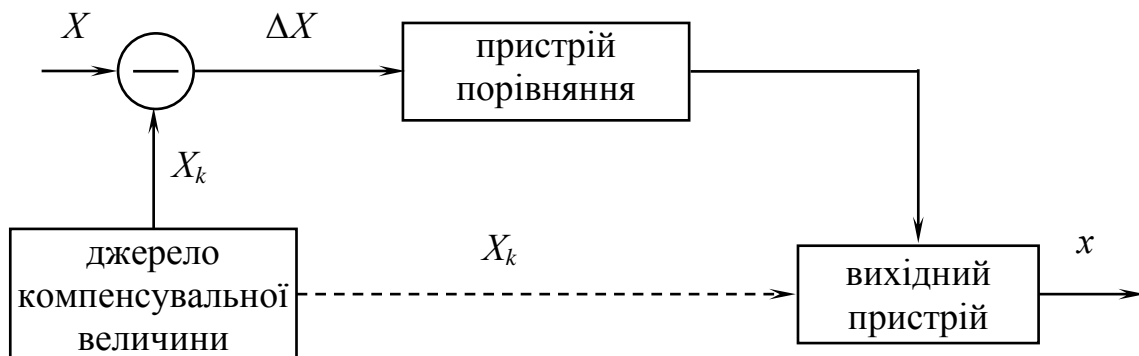


Рисунок 2.6 - Структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання розгортального зрівноважувального перетворення

Слід відзначити, що величина Y - це вихідна величина ділянки прямого перетворення, а коефіцієнт β - це коефіцієнт перетворення зворотного перетворювача. На вхід ділянки прямого перетворення надходить різниця $\Delta X = X - X_k = X - \beta \cdot Y$. Коефіцієнт перетворення K засобу слідкувального зрівноважувального перетворення буде дорівнювати

$$K = \frac{Y}{X} = \frac{k \cdot \Delta X}{X_k + \Delta X} = \frac{k \cdot \Delta X}{k \cdot \beta \cdot \Delta X + \Delta X} = \frac{k}{1 + k \cdot \beta}. \quad (2.3)$$

Відносна похибка дорівнює

$$\delta_K = \frac{dK}{K} = \frac{1}{1 + k \cdot \beta} \cdot \delta_K - \frac{k \cdot \beta}{1 + k \cdot \beta} \cdot \delta_\beta \approx -\delta_\beta. \quad (2.4)$$

Астатичне зрівноважувальне перетворення характеризується тим, що в ділянці прямого перетворення є інтегрувальний перетворювач, завдяки якому після закінчення процесу зрівноваження $\Delta X = X - X_k = 0$, його вихідна величина Y стає рівною усталеному значенню, а значення величини, що вимірюється, можна оцінити як $X = X_k$.

У випадку розгортального зрівноваження компенсувальну величину генерує автономне джерело компенсувальної величини, яка змінюється автоматично до тих пір, поки $\Delta X = X - X_k$ стає таким малим, що починає реагувати пристрій порівняння і подає сигнал на вихідний пристрій про те, що $X = X_k$, а джерело компенсувальної величини подає сигнал про значення X_k .

2.3 Вимірювальні прилади: аналогові та цифрові прилади

Аналогові та цифрові вимірювальні прилади відрізняються способом отримання результату вимірювання.

В аналогових приладах значення фізичної величини, що вимірюється, перетворюється в кутове або лінійне переміщення покажчика (стрілочного чи світлового). Таке переміщення є аналогом розміру вимірюваної величини. Експериментатор безпосередньо здійснює візуальний відлік числового значення величини за шкалою приладу – рисунок 2.7, так виміряне значення опору за показаннями аналогового омметра становить 8 Ом.

У цифрових приладах значення вимірюваної величини отримується автоматично, у вигляді числового значення з відповідною одиницею.

Експериментатор не бере безпосередньої участі у формуванні відліку – рисунок 2.8, так виміряне значення напруги за показаннями цифрового вольтметра дорівнює 126,571 В.

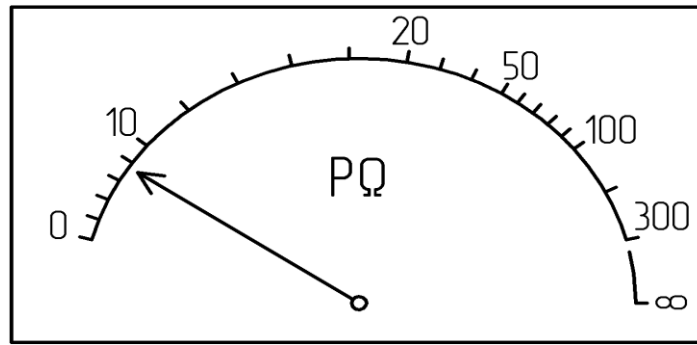


Рисунок 2.7 – Приклад шкали аналогового приладу

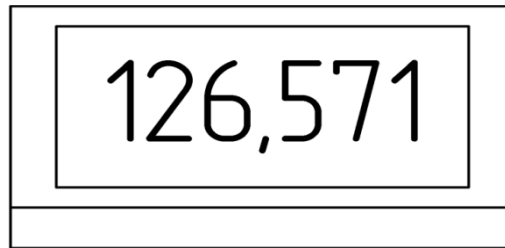


Рисунок 2.8 – Приклад цифрового пристрою відліку цифрового приладу

Аналогові прилади поділяються на електромеханічні та електронні.

Електромеханічний прилад складається з вимірювального кола, вимірювального механізму та пристрою відліку – рисунок 2.9.

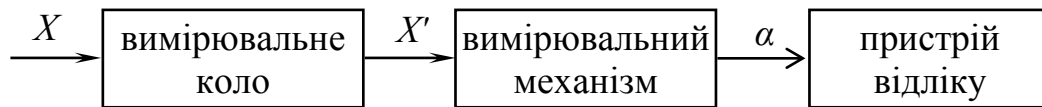


Рисунок 2.9 – Структурна схема електромеханічного приладу

Вимірювальне коло здійснює кількісне чи якісне перетворення вимірюваної електричної величини X в електричну X' , яка зручна для вимірювань. Вимірювальний механізм перетворює електричну величину X' в механічне переміщення (кутове або лінійне) α , значення якого визначається по шкалі пристрою відліку. Пристрій відліку містить шкалу з поділками та покажчик (механічний – стрілочний або світловий – плямка).

Електронний аналоговий прилад складається з вхідного електронного перетворювача вимірюваної величини у вихідну напругу, яка вимірюється електромеханічним вольтметром – рисунок 2.10.



Рисунок 2.10 – Структурна схема електронного аналогового приладу

Вихідною величиною може бути струм, тоді на виході електронного аналогового приладу може використовуватися міліамперметр.

Цифровими вимірювальними приладами є прилади, які в процесі вимірювання здійснюють автоматичне перетворення безперервної вимірювальної величини в дискретну з індикацією результату вимірювань на цифровому пристрої відліку – рисунок 2.11.

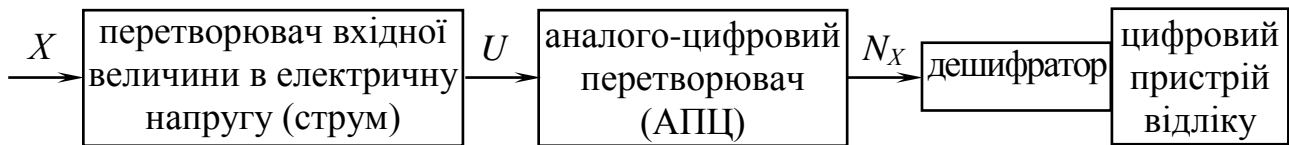


Рисунок 2.11 – Структурна схема цифрового вимірювального приладу

Обов'язковим елементом кожного цифрового вимірювального приладу є **аналого-цифровий перетворювач (АЦП)** - вимірювальний пристрій, що здійснює автоматичне перетворення розміру вихідної величини (напруги) вхідного перетворювача у її цифрове (числове) значення. Таке перетворення має назву *аналого-цифрове перетворення*. На виході цифрового приладу використовується цифровий пристрій відліку, за допомогою якого через дешифратор результат вимірювання подається експериментатору у вигляді цифр або знаків – рисунок 2.11.

Існує широкий спектр вимірювальних приладів, які відрізняються між собою за видом і родом вимірюваних величин, за діапазонами та характеристиками точності їх вимірювань та іншими характеристиками. На промислових об'єктах переважно використовують стаціонарні (щитові) прилади (аналогові та цифрові) для вимірювань однієї величини в одному, сталому діапазоні. Наприклад, вольтметр для вимірювання напруги мережі живлення, термометр для вимірювання температури у технологічній пічці. У технічних та лабораторних вимірюваннях широко застосовуються прилади, які можуть вимірювати декілька величин у різних діапазонах. Такі прилади називають *мультиметрами*, вони здебільшого призначені для вимірювань у різних діапазонах електричних величин: постійних та змінних струму та напруги, електричного опору, частоти і періоду змінних сигналів. Існують мультиметри для вимірювання неелектричних величин зі стандартними функціями перетворення, наприклад, температури при використанні вимірювальних перетворювачів – термісторів, термоелектричних та резистивних перетворювачів.

2.4 Характеристики засобів вимірювальної техніки

Вимірювальна техніка має великий арсенал різноманітних засобів. Проблема правильного вибору необхідного засобу вимірювань є важливою та актуальною. Для вирішення такої проблеми є критерії оцінки ефективності застосування засобів вимірювань, якими є технічні характеристики засобів вимірювань.

Технічні характеристики (метрологічні та неметрологічні) відображають властивості та функціонування засобів вимірювальної техніки.

Метрологічними є ті характеристики засобів вимірювальної техніки, які впливають на результат та точність вимірювання.

Нормованими метрологічними характеристиками вимірювальних приладів є: діапазон вимірювань, клас точності, чутливість та поріг чутливості, стала та ціна поділки шкали, умови застосування – для аналогових вимірювальних приладів, та кількість розрядів і значення одиниці найменшого розряду – для цифрових вимірювальних приладів. Ці характеристики використовуються для оцінювання результатів вимірювань та встановлення параметрів якості виконаних вимірювань.

Характеристики ЗВТ поділяються на:

- характеристики мір фізичних величин;
- характеристики вимірювальних приладів;
- характеристики вимірювальних перетворювачів.

Основними характеристиками мір фізичних величин є *номінальне значення міри, істинне та дійсне значення міри та похибка міри*.

Розглянемо кожну характеристику міри фізичних величин більш детально:

- **номінальне значення міри** – це значення величини, яке присвоєне мірі для відтворення цієї величини, так як істинне значення фізичної величини не можливо визначити через неминучість похибки вимірювання;

- **дійсне значення міри** – це значення міри, яке знайдене вимірюванням з точністю, яка дозволяє використовувати його замість істинного значення фізичної величини;

- **похибка міри** – це різниця між номінальним значенням міри й істинним X (дійсним X_0) значенням величини, яку міра відтворює, а саме

$$\Delta_m = X_n - X = X_n - X_0, \quad (2.5)$$

Оскільки, дійсне значення міри ближче до істинного значення, ніж номінальне, то, щоб підвищити точність оцінювання вимірюваної величини під час порівняння з мірою, замість X_n треба використовувати X_0 , яке вказується у технічній документації на міру.

Основними характеристиками вимірювальних приладів є діапазон показів, діапазон вимірювань, поріг чутливості, ціна поділки шкали та стала приладу – для аналогових вимірювальних приладів та **значення одиниці найменшого розряду** – для цифрових вимірювальних приладів.

Як було зазначено в пункті 2.3 складовою частиною аналогового приладу є шкала. **Шкала** – це частина пристрою відліку у вигляді впорядкованої сукупності позначок разом з пов'язаною з нею певною послідовністю чисел. Позначкою шкали може бути риска або інший знак на шкалі, що відповідає одному або декільком значенням вимірюваної величини.

Якщо довжина поділок (відстань між осями сусідніх позначок) є сталою вздовж всієї шкали, то така шкала є **рівномірною**. Шкала з поділками різної довжини має назву **нерівномірною (нелінійною)**.

На рисунку 2.12 наведена структура шкали аналогового приладу - ватметра, яка наочно пояснює такі характеристики аналогового приладу, як діапазон показів, межі (границі) та діапазон вимірювань.

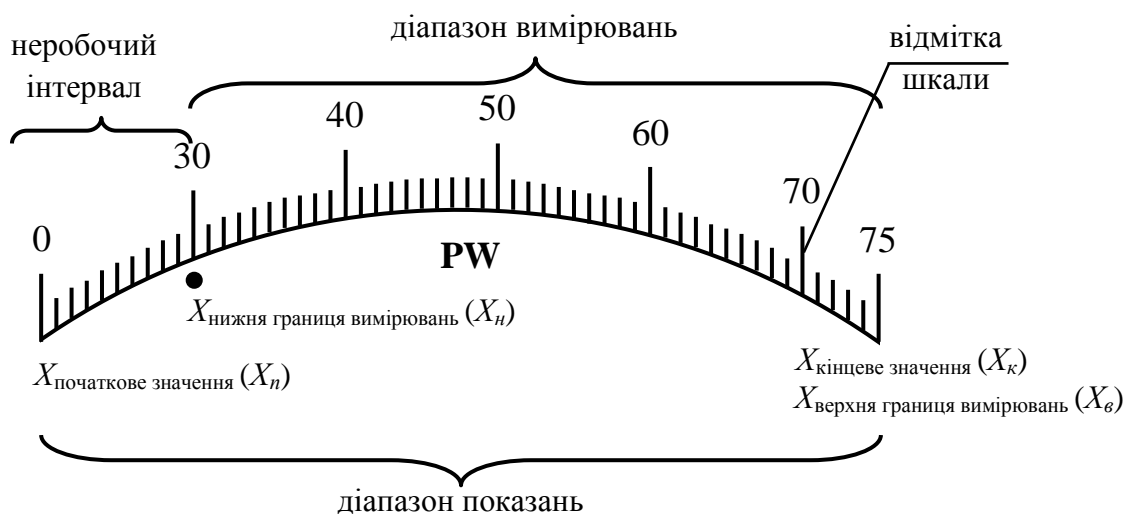


Рисунок 2.12 - Структура шкали аналогового ватметра

Вказане на шкалі **початкове значення шкали** X_n є найменшим значенням вимірюваної величини X . Вказане на шкалі **кінцеве значення шкали** X_k є найбільшим значенням вимірюваної величини X .

Діапазон показань – це інтервал значень вимірюваної величини, який обмежений найменшим у діапазоні показів та найбільшим її значенням.

Частина діапазону показів засобу вимірювань, для якої про нормовані границі допустимих похибок, називається **діапазоном вимірювань**.

Найменше і найбільше значення діапазону вимірювань називають **нижньою** X_n і **верхньою** X_v **границею вимірювань**.

Верхня границя вимірювання X_g практично завжди збігається з верхньою границею показів X_k ЗВ, тобто $X_g = X_k$, а нижня границя вимірювання X_n не завжди збігається з початковим значенням шкали X_n , як видно з рисунку 2.12.

Інтервал показів між позначками шкали X_n та X_n є *неробочим* і не входить в діапазон вимірювань засобу вимірювання. У таких випадках нижню границю вимірювання X_n засобу позначають **спеціальною точкою** на шкалі біля цифри.

Враховуючи усе вище наведене визначаємо згідно рисунку 2.12:

- початкове значення шкали X_n дорівнює 0 Вm ;
- нижня границя вимірювання X_n дорівнює 30 Вm ;
- верхня границя вимірювання X_g дорівнює верхній границі показів X_k та дорівнюють 75 В ;
- діапазон показів становить $0 \dots 75 \text{ Вm}$;
- діапазон вимірювань становить $30 \dots 75 \text{ Вm}$.

Показ вимірювального приладу (x) – це значення вимірюваної величини, яке відтворене шкалою вимірювального приладу і подане сигналом вимірювальної інформації. Найбільше число, яке можна зчитати з пристрою відліку, має назву **максимальний показ**.

Відлік (N_g) – це неіменоване абстрактне число, яке зчитане з пристрою відліку або одержане підрахунком послідовних позначок чи сигналів. Найбільше число, яке можна зчитати з пристрою відліку, має назву **максимальний відлік ($N_{В.мах}$)**.

Ціна поділки шкали (C_{nod}) – це різниця значень вимірюваної величини, що відповідає відстані між двома найближчими позначками шкали.

Стала приладу (C) – це відношення границі вимірювання приладу (X_k) або максимального значення багатозначної міри до максимального показу і є іменованим числом в одиницях величини x .

Сталу приладу визначають за виразом

$$C = \frac{X_k}{N_{В.мах}}. \quad (2.6)$$

Показ x , відлік N_g , стала приладу C і ціна поділки шкали C_{nod} пов'язані між собою співвідношенням

$$x = N_g \cdot C = N_{nod} \cdot C_{nod}. \quad (2.7)$$

Приклад 2.1 Визначити сталу вольтметра з границею вимірювання 600 В і з максимальним відліком 150 .

Розв'язання.

Так як границя вимірювання приладу $U_K = 600 \text{ В}$, максимальний відлік $N_{B.max} = 150$, тоді за виразом (3.6) визначається стала вольтметра $C_{PV} = \frac{U_K}{N_{B.max}} = \frac{600 \text{ В}}{150} = 4 \text{ В}$.

Приклад 2.2 Визначити сталу ватметра з границею вимірювання напруги 150 В та границею вимірювання струму 5 А та з максимальним відліком 75 .

Розв'язання. Так як границя вимірювання активної потужності ватметра дорівнює $P_K = U_K \cdot I_K = 150 \text{ В} \cdot 5 \text{ А} = 750 \text{ Вт}$, отже, стала ватметра дорівнює

$$C_{PW} = \frac{U_K \cdot I_K}{N_{B.max}} = \frac{750}{75} = 10 \text{ Вт / под.}$$

Приклад 2.3 Задана шкала амперметра на 5 А і положення покажчика (див. рисунок). Визначити відлік, зчитану кількість поділок, сталу та ціну поділок, показ відповідно до сталої та показ відповідно до ціни поділки.

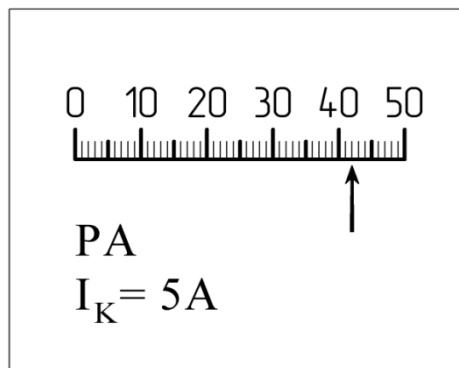


Рисунок до прикладу 2.3

Розв'язання.

1. Границя вимірювання приладу $I_K = 5 \text{ А}$; максимальний відлік $N_{B.max} = 50$; максимальна кількість поділок $N_{под.max} = 50$.
2. Відлік дорівнює $N_г = 42$; зчитана кількість поділок $N_{под} = 42$.
3. Згідно виразу (3.6) та означення ціни поділки шкали визначаємо, що стала амперметра дорівнює

$$C_{PA} = \frac{I_K}{N_{B.max}} = \frac{5}{50} = 0,1 \text{ А/поділ,}$$

а ціна поділки дорівнює $C_{под} = 0,1 \text{ мА/под.}$

4. Показ амперметра I відповідно до сталої амперметра дорівнює

$$I = N_г \cdot C_{PA} = 42 \cdot 0,1 = 4,2 \text{ А.}$$

5. Показ амперметра I відповідно до ціни поділки шкали амперметра дорівнює

$$I = N_{под} \cdot C_{под} = 42 \cdot 0,1 = 4,2 \text{ А.}$$

Характеристикою засобу вимірювань, яка визначає близькість його показів до істинного значення вимірюваної величини, є точність засобу вимірювань. Показником точності є клас точності 3 В .

Клас точності засобу вимірювань – це узагальнена характеристика засобу, яка визначається границями його допустимих основної і додаткових похибок, а також регламентованими характеристиками, що впливають на його точність. Слід відзначити, що клас точності ЗВ – це не похибка, а кількісна характеристика, за величиною якої можна оцінити похибку ЗВ.

На практиці можна застосувати вимірювальний прилад високого класу точності, але в результаті неправильно проведеного експерименту (наприклад, в області неробочого інтервалу вимірювань) отримати велику похибку показу приладу.

В таблиці 2.1 наведені умовні позначення класів точності ЗВ з поясненням їх змісту.

Таблиця 2.1 - Умовні позначення класів точності ЗВ

| Позначення класу точності | | Форма похибки | Вираз для оцінювання, границі допустимої основної похибки | Пояснення |
|---------------------------|--------------------------|---------------|--|--|
| на засобі вимірювання | в технічній документації | | | |
| 0,5 | клас точності 0,5 | зведена | $\gamma = \frac{\Delta X}{X_H} \cdot 100\%;$ $\gamma = \pm 0,5\%$ | нормоване значення X_H визначено в одиницях вимірюваної фізичної величини |
| $\surd 1,5$ | клас точності 1,5 | зведена | $\gamma = \frac{\Delta X}{X_H} \cdot 100\%;$ $\gamma = \pm 1,5\%$ | нормоване значення X_H приймається рівним довжині шкали або її частині |
| $\bigcirc 2,5$ | клас точності 2,5 | відносна | $\delta = \pm 2,5\%$ | позначення класу точності надає безпосередню вказівку на границю допустимої основної похибки |

Для цифрових приладів клас точності на шкалі позначається записом, наприклад, 0,02/0,01. В технічній документації це позначення класу точності у вигляді c/d , яке дорівнює 0,02/0,01. Форма похибки – відносна, яка визначається за формулою

$$\delta = \pm \left[c + d \times \left(\left| \frac{X_K}{x_{вим}} \right| - 1 \right) \right] \cdot 100\%. \quad (2.8)$$

Клас точності, в загальному вигляді, записується через косу риску з двома літерами c/d : літера d – клас точності при нульовому значенні $x = 0$, літера c – клас точності при кінцевому значенні $x = X_k$.

Числове значення класу точності ЗВТ вказується на циферблаті аналогового вимірювального приладу або у паспорті чи технічному описі приладу, як для багатограничних цифрових вимірювальних приладів.

Основною характеристикою цифрових вимірювальних приладів є значення одиниці найменшого розряду – це розмір одного кванта q цифрового ЗВ, що відповідає різниці між двома сусідніми станами цифрового вихідного значення.

Показ для цифрових приладів визначається співвідношенням

$$x = N_x \cdot q, \quad (2.9)$$

де N_x – кількість кроків квантування (квантів) з розміром q , який відповідає одиниці молодшого розряду цифрового ЗВ.

Стала цифрового ЗВ збігається з ціною поділки і дорівнює розміру кроку квантування q

$$C = C_{\text{нод}} = q. \quad (2.10)$$

Для вимірювальних перетворювачів існують *статичні* та *динамічні характеристики*.

Статична характеристика перетворення відповідає статичному режиму роботи вимірювального перетворювача, за якого перетворювана величина не залежить від часу, а тривалість перетворення достатня для загасання перехідних процесів у вимірювальному колі.

Основними статичними характеристиками вимірювальних перетворювачів є характеристика градування, номінальна статична функція перетворення, коефіцієнт перетворення, чутливість та поріг чутливості (зона нечутливості) та похибки.

В таблиці 2.2 наведені означення нормованих метрологічних характеристик вимірювальних перетворювачів.

Для вимірювальних перетворювачів основною статичною характеристикою є **поріг чутливості**, який характеризує найменше значення вхідної величини, що викликає помітну зміну вихідної величини, та має розмірність вимірюваної величини. Наприклад, функцією перетворення термоелектричного перетворювача є залежність між електрорушійною силою E та температурою середовища Θ : $E=F(\Theta)$. Чутливість такого термоелектричного перетворювача має розмірність $[mV/^\circ C]$, а поріг чутливості має розмірність $[^\circ C]$.

Зона нечутливості – це діапазон значень вимірюваної величини, в межах якого її зміна не викликає зміни показу засобу вимірювань.

Таблиця 2.2 - Нормовані метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів

| Метрологічні характеристики | Означення |
|--|---|
| Характеристика градування | це залежність між значеннями вимірювальної (перетворюваної) величини на виході та вході вимірювального перетворювача, визначена під час градування та подана у вигляді експериментальної таблиці, графічної залежності або аналітичної формули. |
| Номінальна статична функція перетворення | це функціональна залежність між інформативним параметром Y вихідного сигналу та інформативним параметром X вхідного сигналу $Y = F(X)$ |
| Коефіцієнт перетворення | це відношення вихідної величини Y до вхідної величини X $k(X) = \frac{Y}{X}$ |
| Чутливість перетворення | це відношення зміни вихідного сигналу ΔY зміни вхідного сигналу ΔX , що викликала цю зміну вихідного сигналу – це похідна функції перетворення $s(X) = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$ |

Абсолютна похибка перетворювача за виходом – це різниця між істинним значенням вихідної величини перетворювача, що відповідає вхідній величині, та значенням вихідної величини, яка одержана за істинним значенням вхідної величини за допомогою номінальної функції перетворення.

Описані вище характеристики є статичними, тобто такими, які характеризують статичний режим роботи вимірювального перетворювача, при цьому розмір вимірюваної величини за час її вимірювання залишається незмінним, а час вимірювання є достатнім для загасання перехідних процесів, що виникають у вимірювальному колі при наявності вхідного сигналу. Статичний режим роботи перетворювача є граничним випадком динамічного режиму роботи. За такий режим розмір вимірюваної величини за час її вимірювання може змінитися, а за час вимірювання не досягається повне загасання перехідних процесів. У такому разі необхідно вимірювання здійснювати за найкоротший час.

Основними динамічними характеристиками вимірювальних перетворювачів є час перетворення та гранична частота перетворення.

Час перетворення перетворювача – це час, за який динамічна похибка стає допустимою похибкою.

Гранична частота перетворення – це така частота сигналу, при якому динамічна похибка стає допустимою похибкою.

Крім метрологічних характеристик засобів вимірювань важливо знати їх й неметрологічні характеристики, а саме, *надійність, роботоздатність, відмова, безвідмовність, довговічність, економічність та термін служби.*

В таблиці 2.3 наведені неметрологічні характеристики ЗВ та їх означення.
Таблиця 2.3 - Неметрологічні характеристики ЗВТ

| Неметрологічна характеристика | Означення |
|---------------------------------|---|
| Надійність | Здатність ЗВТ зберігати свої характеристики у заданих межах за певних умов експлуатації упродовж заданого часу. |
| Роботоздатність | Стан ЗВТ, при якому він здатний виконувати свої функції згідно з вимогами нормативно-технічної та конструкторсько-технологічної документації. |
| Відмова | Стан ЗВТ, при якому здійснюється порушення його роботоздатності. Відмова поділяється на <i>раптову відмову</i> та на <i>поступову відмову</i> . |
| Безвідмовність | Властивість ЗВТ зберігати роботу здатність упродовж певного інтервалу часу у певних умовах експлуатації. |
| Ймовірність безвідмовної роботи | Ймовірність того, що протягом певного часу безперервної роботи не відбудеться жодної відмови. |
| Економічність | Простота конструкції ЗВТ та виправдана економічна вартість. |
| Довговічність | Властивість ЗВТ зберігати роботоздатність і задану ефективність в часі. |

Контрольні запитання при вивченні теми 2

- 1 Що таке засоби вимірювальної техніки?
- 2 Що таке засоби вимірювань? Наведіть приклади.
- 3 Що таке вимірювальні пристрої? Наведіть приклади.
- 4 Розкрийте суть поняття «структурна схема вимірювального пристрою».
- 5 Що таке метрологічні та неметрологічні характеристики ЗВТ?

6 Охарактеризуйте такі поняття «шкала приладу», «діапазон показань та діапазон вимірювань», «показ вимірювального приладу», «ціна поділки» та «стала приладу».

7 Як пов'язані між собою показ, стала приладу та ціна поділки?

8 Що таке чутливість ЗВТ та його поріг чутливості?

9 Наведіть умовні позначення класів точності ЗВ та поясніть їх зміст.

10 Як класифікують засоби вимірювань за метрологічними характеристиками?

Список літератури

1. Нестерчук Д.М. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 256 с.

2. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. - 172 с.

3. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

4. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.

5. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 656 с.

ТЕМА 3. МЕТРОЛОГІЧНА ПОВІРКА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

План лекції

- 3.1 Мета і види метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки
- 3.2 Методи метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки
- 3.3 Метрологічна повірка приладів прямого перетворення

3.1 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.

Періодична повірка виконується протягом експлуатації ЗВТ через встановлений проміжок часу.

Позачергова повірка ЗВТ здійснюється раніше терміну чергової періодичної повірки.

Інспекційна повірка ЗВТ виконується при здійсненні державного нагляду та відомчого контролю за станом і використанням ЗВТ органами метрологічних служб.

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.

3.2 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 використовуються 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, X_{II} , з показаннями зразкового приладу, $X_{ЗР}$, та визначають похибку, Δ , приладу, що повіряється

$$\Delta = X_{II} - X_{ЗР}. \quad (3.1)$$

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 $X_{ПОВ}$ цифрового приладу, що повіряється, з подальшим визначенням абсолютної похибки, Δ , як різниці між показом ЗВТ, що повіряється, $X_{ПОВ}$, і дійсним значенням міри, X_N : $\Delta = X_{ПОВ} - X_N$.

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.

Приклад 3.1. Застосування методу непрямих вимірювань розглянемо на прикладі повірки лічильника електричної енергії, відносну похибку, $\delta_{\text{ліч}}$, якого розраховують за формулою

$$\delta_{\text{ліч}} = \frac{W_{\text{П}} - W_{\text{ЗР}}}{W_{\text{ЗР}}} \cdot 100\%,$$

де $W_{\text{П}}$ – значення електричної енергії за показами лічильника, що повіряється;

$W_{\text{ЗР}}$ – значення електричної енергії за показами зразкового лічильника.

За відсутності зразкового лічильника необхідної точності значення $W_{\text{ЗР}}$ можна визначити як добуток потужності на час за показами зразкового ватметра і зразкового секундоміра.

Висновок: при проведенні повірки лічильника методом непрямих вимірювань електричної енергії сумарна похибка зразкових ЗВТ складається з похибки вимірювання потужності та похибки вимірювання часу і не повинна перевищувати допустимого для цього лічильника значення.

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 окре-

ними елементами схем ЗВТ, що повіряється, з величиною, яка вибрана як база 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 ЗВТ. 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;

- похибка вимірювання зразковим ЗВТ, $\delta_{ЗР,ЗР}$ або сумарна похибка вимірювання зразковими ЗВТ не повинна перевищувати $1/\alpha$ від значення похибки ЗВТ, що повіряється, $\delta_{ПОВ,ЗР}$ при вимірюванні ними одного і того самого значення вимірюваної величини, тобто

$$\delta_{ЗР,ЗР} \leq \frac{1}{\alpha} \cdot \delta_{ПОВ,ЗР}, \quad (3.2)$$

де $1/\alpha$ - співвідношення між похибками зразкового ЗВТ та ЗВТ, що повіряється.

Значення співвідношення α між похибками $\delta_{ЗР,ЗР}$ та $\delta_{ПОВ,ЗР}$ може набувати такі значення: 1:2; 1:2,5; 1:3; 1:4; 1:5 та 1:10. Співвідношення 1:3 є достатнім для того, щоб похибка зразкового ЗВТ істотно не впливала на результати повірки. На основі співвідношення (3.2) можна визначити необхідний клас точності зразкового ЗВТ. Наприклад, для повірки приладу прямого перетворення (амперметра чи вольтметра), клас точності якого встановлено у вигляді основної допустимої зведеної похибки $\gamma_{П,ЗР}$ якого визначають на основі (5.2) як

$$\gamma_{ЗР,ЗР} \leq \alpha \cdot \gamma_{П,ЗР} \cdot \frac{X_{К,П}}{X_{К,ЗР}}, \quad (3.3)$$

де α - співвідношення між похибками зразкового ЗВТ та ЗВТ, що повіряється;

$\alpha = 1/3; 1/4; 1/5;$

$X_{К,П}, X_{К,ЗР}$ - границі вимірювань ЗВТ, що повіряється, та зразкового.

3.3 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 роботоздатності 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 калібратора 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 *вольтметрів класів точності 0,1 ... 0,5*;
- метод безпосереднього порівняння із зразковими вольтметрами для *вольтметрів 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.

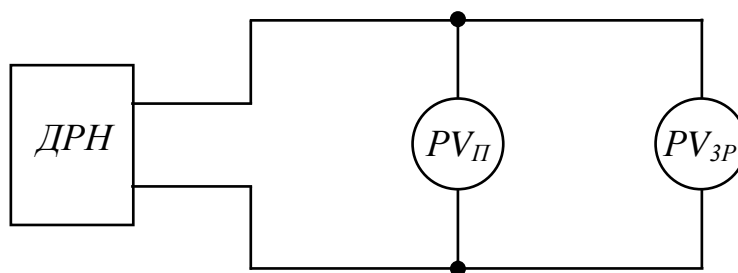
При виборі системи зразкового приладу керуються такими вимогами:

- перевірка 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.

При виборі границі вимірювання зразкового приладу необхідно виходити із співвідношення

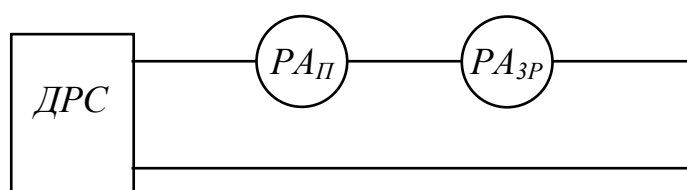
$$X_{к.ЗР} \geq X_{к.П} \quad (3.4)$$

На рисунку 3.1 наведена схема перевірки вольтметрів, а на рисунку 3.2 наведена схема перевірки амперметрів методом безпосереднього порівняння із зразковими приладами.



ДРН – джерело регулювання напруги

Рисунок 3.1 – Схеми повірки вольтметра методом безпосереднього порівняння із зразковим вольтметром



ДРС – джерело регулювання струму

Рисунок 3.2 – Схеми повірки амперметра методом безпосереднього порівняння із зразковим амперметром

Значення абсолютної похибки, Δ , для таких схем визначається як різниця між показом X_{II} приладу, що повіряється, та показом зразкового приладу $X_{ЗР}$ за формулами:

- для схеми рисунку 3.1

$$\Delta = U_{II} - U_{ЗР}; \quad (3.5)$$

- для схеми рисунку 3.2

$$\Delta = I_{II} - I_{ЗР}. \quad (3.6)$$

Відносна похибка вимірювання, $\delta_{ЗР.зр}$, зразковим приладом дорівнює значенню похибки показів зразкового приладу

- для схеми рисунку 3.1

$$\delta_{ЗР.зр} = \pm \delta_{PV_{ЗР}}, \quad (3.7)$$

де $\delta_{PV_{ЗР}}$ - похибка показу зразкового вольтметра, %;

- для схеми рисунку 3.2

$$\delta_{ЗР.зр} = \pm \delta_{РА_{ЗР}}, \quad (3.8)$$

де $\delta_{PA_{3p}}$ - похибка показу зразкового амперметра, %.

Для розширення границь вимірювань зразкових приладів використовують подільники напруги при повірці вольтметрів на постійному та змінному струмі і вимірювальні трансформатори напруги тільки на змінному струмі. При повірці амперметрів використовують на постійному струмі шунти, а на змінному струмі – вимірювальні трансформатори струму.

Похибки показів зразкових приладів: амперметра, $\delta_{PA_{3p}}$, вольтметра, $\delta_{PV_{3p}}$, ватметра, $\delta_{PW_{3p}}$, визначають відповідно за формулами

$$\delta_{PA_{3p}} = \pm \gamma_{PA_{3p}} \cdot \frac{X_{K.PA_{3p}}}{X_{PA_{3p}}}, \quad (3.9)$$

де $\gamma_{PA_{3p}}$ - клас точності зразкового амперметра;

$X_{K.PA_{3p}}$ - границя вимірювання зразкового амперметра;

$X_{PA_{3p}}$ - показ зразкового амперметра, що відповідає показові амперметра, що повіряється;

$$\delta_{PV_{3p}} = \pm \gamma_{PV_{3p}} \cdot \frac{X_{K.PV_{3p}}}{X_{PV_{3p}}}, \quad (3.10)$$

де $\gamma_{PV_{3p}}$ - клас точності зразкового вольтметра;

$X_{K.PV_{3p}}$ - границя вимірювання зразкового вольтметра;

$X_{PV_{3p}}$ - показ зразкового вольтметра, що відповідає показові вольтметра, що повіряється;

$$\delta_{PW_{3p}} = \pm \gamma_{PW_{3p}} \cdot \frac{X_{K.PW_{3p}}}{X_{PW_{3p}}}, \quad (3.11)$$

де $\gamma_{PW_{3p}}$ - клас точності зразкового ватметра;

$X_{K.PW_{3p}}$ - границя вимірювання зразкового ватметра.

$X_{PW_{3p}}$ - показ зразкового ватметра, що відповідає показові ватметра, що повіряється.

Приклад 3.1 Необхідно провести повірку (обрати метод та повірки схему) електромагнітного вольтметра типу ЭВ0302/1 класу точності 1,5 з діапазоном вимі-

рювання 0...250 В, який призначений для вимірювань напруги у колах змінного синусоїдального струму частотою 45...65 Гц.

Розв'язання.

1.Повірка вольтметра здійснюється за методом безпосереднього порівняння із зразковим вольтметром за схемою – рисунок 3.1.

2. Так як вольтметр, що повіряється, призначений для вимірювань середньоквадратичних значень змінної напруги, то у якості зразкового можна використовувати вольтметр електромагнітної та електродинамічної системи. Обираємо зразковий вольтметр з границею вимірювання 300 В.

3. Клас точності $\gamma_{PV_{зр.зр}}$ зразкового вольтметра визначається за виразом

$$\gamma_{PV_{зр.зр}} \leq \alpha \cdot \gamma_{зр} \cdot \frac{U_{HPVn}}{U_{HPVзр}},$$

де α – співвідношення між похибками зразкового вольтметра та вольтметра, що повіряється; приймаємо $\alpha=1:4$;

$\gamma_{зр}$ – клас точності вольтметра, що повіряється;

U_{HPVn} – границя вимірювання вольтметра, що повіряється;

$U_{HPVзр}$ – границя вимірювання зразкового вольтметра

$$\gamma_{PV_{зр.зр}} \leq \frac{1}{5} \cdot 1,5 \cdot \frac{250}{300} = 0,25\%.$$

4. Так як вольтметри електромагнітної системи класу точності 0,2 відсутні, то обирається зразковий вольтметр електродинамічної системи типу Д5082 класу точності 0,2 з границею вимірювання 300 В з номінальною областю частот 40...1000 Гц.

Приклад 3.2 Необхідно провести повірку (обрати метод та повірки схему) електромагнітного амперметра типу ЭА0302/1 класу точності 1,5 з діапазоном вимірювання 0...30 А, який призначений для вимірювань у колах змінного синусоїдального струму частотою 45...65 Гц.

Розв'язання.

1.Повірка амперметра здійснюється за методом безпосереднього порівняння із зразковим амперметром. Так як зразкові амперметри електромагнітної та електродинамічної системи мають границі вимірювань до 10 А, то повірка буде здійснюватись за схемою, яка наведена на рисунку.

2. Обираємо вимірювальний трансформатор струму типу И515М класу точності 0,1 з номінальним коефіцієнтом трансформації $K_{IH} = 50/5$ на частоті струму 50

Гц. При повірці амперметра, границя вимірювання якого дорівнює 30 А, вторинний струм трансформатора струму дорівнює $I_2 = \frac{I_1}{k_{IH}} = \frac{I_{HРА}}{k_{IH}} = \frac{30}{50/5} = 3 \text{ А}$.

3. Для вимірювання сили струму 3 А обираємо зразковий амперметр електродинамічної системи типу Д5014/2 класу точності 0,2 з границею вимірювання 5 А і частотним діапазоном 45...1000 Гц.

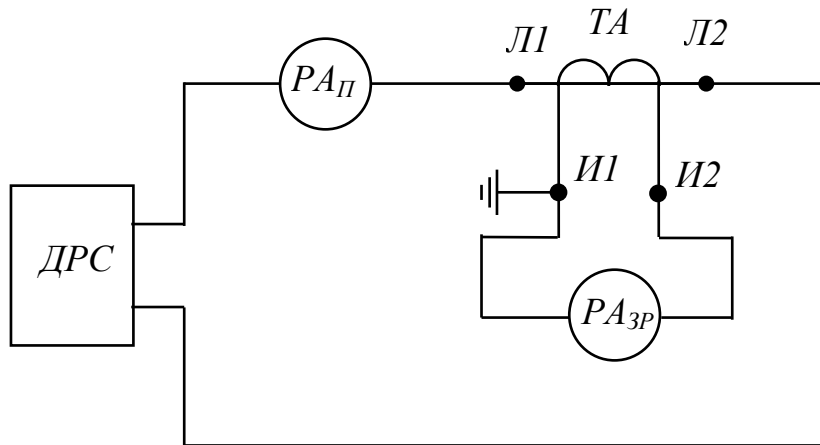


Рисунок до прикладу 3.2

4. Похибка зразкового амперметра $\delta_{РА_{зр.зр}}$ при вимірюванні струму 3 А дорівнює

$$\gamma_{РА_{зр.зр}} \leq \gamma_{РА_{зр.зр}} \cdot \frac{I_{HРА_{зр}}}{I_2} = \pm 0,2 \cdot \frac{5}{3} = \pm 0,36\%.$$

5. Сумарна похибка $\delta_{зр.зр}$ зразкових приладів при повірці амперметра, який включений через трансформатор струму, визначається

$$\delta_{зр.зр} = \pm(\delta_{РА_{зр.зр}} + f_{ТА.зр}),$$

де $f_{ТА.зр}$ - клас точності трансформатора струму;

$$\delta_{зр.зр} = \pm(0,36 + 0,1) = \pm 0,46\% < \pm 0,5\%.$$

6. Умова забезпечення необхідної точності повірки амперметра виконується, так як сумарна похибка зразкових приладів не перевищує $\pm 0,5\%$.

Контрольні запитання при вивченні теми 3

- 1 Що таке повірка засобів вимірювальної техніки? Яка мета повірки?
- 2 Які види повірок Вам відомі?
- 3 Охарактеризуйте метод безпосереднього порівняння засобу вимірювань зі зразковим приладом.
- 4 Що таке автономна повірка ЗВТ?
- 5 Охарактеризуйте основні операції повірки.

6 Які повинен співвідноситися клас точності зразкового приладу та приладу, що повіряється?

7 За якими аналітичними формулами визначаються величини абсолютної, відносної та приведеної похибок приладу, що повіряється, за результатами повірки?

8 За якими аналітичними формулами визначаються величини похибок показів зразкових приладів при повірці ватметрів методом безпосереднього повірвання із зразковим приладом при роздільному живленні кіл струму та напруги?

Список літератури

1. Нестерчук Д.М. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 256 с.

2. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. - 172 с.

3. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

4. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 656 с.

ТЕМА 4. ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ

План лекції

- 4.1 Фактори, які впливають на процес формування похибок вимірювань
- 4.2 Класифікація похибок вимірювань
- 4.3 Систематична та випадкова похибки
- 4.4 Виявлення та виключення систематичних похибок

4.1 Фактори, які впливають на процес формування похибок вимірювань

Точність вимірювання є ступенем відповідності результату вимірювання істинним значенням вимірюваної величини та позитивною якісною ознакою вимірювання. Чим ближче результат вимірювання до істинного значення, тим точніше вимірювання і навпаки. Зазвичай точність вимірювання не має числового вираження, а є лише суто якісною характеристикою.

Існують причини виникнення похибок, відрізняючись своїми властивостями, вони по-різному впливають на результат вимірювання, а саме:

- недосконалість засобів, що використовують при вимірюваннях (інструментальний фактор);
- вплив зовнішніх умов на об'єкт та засоби вимірювань;
- недостатня кваліфікація експериментатора, що здійснює вимірювання;
- взаємний вплив засобів вимірювань та об'єкта;
- не збігання моделі вимірюваної величини та справжньої властивості об'єкта, розмір якої слід виміряти;
- недосконалість обчислювального алгоритму та обчислень при опрацюванні первинних результатів вимірювань для кінцевих результатів;
- неточні калібрування;
- часові зміни вимірювальної величини та властивостей ЗВТ;
- математичні спрощення (математичний фактор);
- втрати цифрових даних під час передавання та зберігання.

Процедура вимірювання складається з етапів: прийняття моделі об'єкта вимірювання, вибір методу вимірювання, вибір засобу вимірювання та проведення експерименту для отримання результату вимірювань.

На кожному з етапів виникає та існує невідповідність між ідеальними і реальними умовами, тому то результат вимірювання відрізняється від істинного значення фізичної величини.

Для кількісної оцінки якості вимірювання застосовують *похибку результату вимірювання (похибку вимірювання)*, яка є відхиленням результату вимірювання x від істинного (дійсного) значення X_I (X_θ) вимірюваної величини

$$\Delta = x - X_I = x - X_\theta. \quad (4.1)$$

Істинне значення фізичної величини – це значення фізичної величини, яке ідеально відображає певну властивість об'єкту. Визначити істинне значення величини вимірюванням неможливо через обмежені властивості ЗВТ. Тому то відмічена неможливість визначення істинного значення є наслідком недосконалості відображення при вимірюваннях та є причиною неминучої похибки вимірювання. Для визначення похибки вимірювань істинне значення фізичної величини замінюють дійсним значенням величини.

Дійсне значення фізичної величини – це значення фізичної величини, яке знайдене експериментальним шляхом і настільки наближене до істинного значення, що може використовуватись замість істинного значення.

Вимірювання виконують не ідеальними засобами, їх взаємодія з об'єктом може привести до небажаної зміни розміру вимірюваної величини. Експериментатор може допускати певні неточності при проведенні вимірювального експерименту та при обчисленні результатів, а також умови, в яких відбуваються вимірювання, змінюються і негативно впливають на об'єкт вимірювання, при цьому можуть змінюватись, як розмір вимірюваної величини, так і засоби вимірювальної техніки.

4.2 Класифікація похибок вимірювань

Похибки вимірювань класифікують за п'ятьма основними класифікаційними ознаками:

- за способом вираження;
- за причинами чи місцями виникнення;
- за характером зміни вимірюваної величини;
- за режимом виникнення;
- за характером поведінки у часі.

На рисунку 4.1 наведена класифікація похибок вимірювання.

У загальному випадку похибка результату вимірювання містить *систематичну й випадкову* складові та навіть коли була введена *поправка* – це значення величини, що алгебраїчно додається до результату вимірювання з метою вилучення систематичної похибки. Пояснити це, по-перше, можна тим, що значення факторів не залишаються у процесі вимірювання постійними, а, по-друге, тим, що на результат вимірювання впливають фактори, дія яких у експерименті не передбачалася, або ж виникли фактори, дію яких неможливо було врахувати.

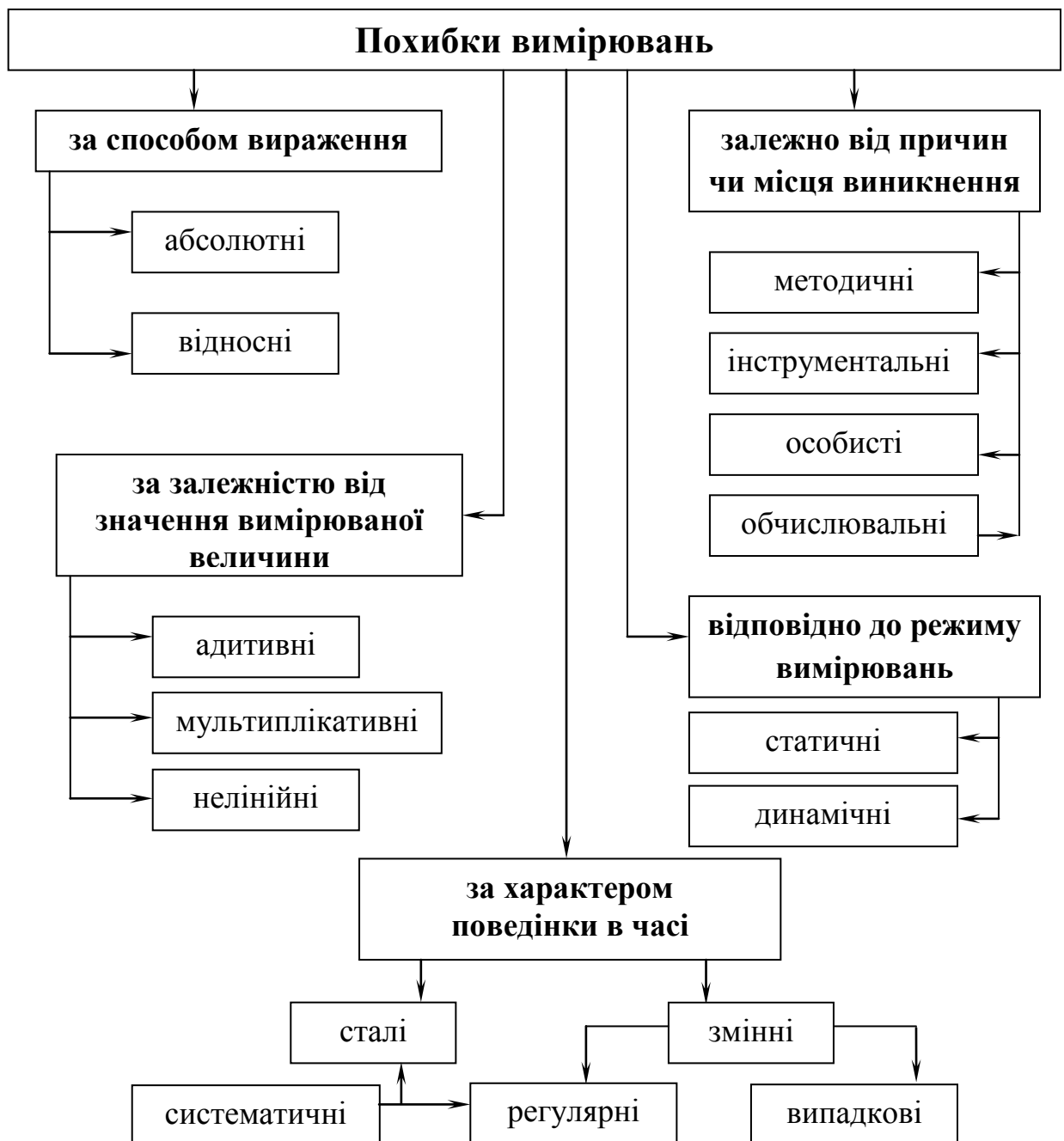


Рисунок 4.1 – Класифікація похибок вимірювань

Внаслідок дії зазначених факторів виникають різні види похибок, а саме:

- **систематична похибка** – це складова похибки, що залишається сталою або прогнозовано змінюється у ряді вимірювань однієї й тієї ж величини;
- **випадкова похибка** – це складова похибки, що не прогнозовано (випадково) змінюється у ряді вимірювань однієї й тієї ж величини;
- **інструментальні похибки**, що зумовлені недосконалістю ЗВТ та залежністю їх властивостей від впливу зовнішніх умов. Така похибка присутня завжди, так як вимірювання неможливе без вимірювальних засобів;

- під час вимірювань різні за кваліфікацією виконавці вимірювань по-різному визначають покази аналогових приладів, при цьому похибка може сягати до половини поділки, а то і більше. Така похибка має назву **особиста**. Слід відзначити, що під час застосування цифрових ЗВТ така похибка не виникає;

- **методичні похибки** зумовлені методом вимірювання та вимірювально-го перетворення. Такі похибки пов'язані з невідповідними моделями вимірюваних об'єктів та їх величин, а виникають вони при взаємодії засобів вимірювальної техніки та об'єктів. На вибір моделі вимірюваної величини впливає мета вимірювання, яка встановлює потрібну точність вимірювання;

- причинами виникнення **обчислювальної похибки** можуть стати ефекти заокруглення та обчислювальні проблеми розв'язування вимірювальної задачі. Так як при проведенні вимірювань для отримання результату опрацьовують первинні результати спостережень за відповідними виразами, алгоритмами та залежностями, тому виконують певні обчислення. В залежності від складності вимірювальної задачі обчислення здійснюють за допомогою обчислювальних засобів різної складності: від олівця та паперу до калькулятора та обчислювальних комплексів. При обчисленні виконують заокруглення чисел, так й виникає похибка від заокруглень. Сам алгоритм розв'язування вимірювальної задачі є нестійким, так як при невеликих похибках у вихідних даних (тисячні чи сотні частки відсотка) результат розрахунку може містити похибку, яка дорівнює одиниці чи десяткам відсотків і навіть більше;

- **абсолютна похибка вимірювання** – це різниця між результатом вимірювання та істинним (дійсним) значенням вимірюваної величини;

- **відносна похибка вимірювання** – це відношення абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини;

- **статичні похибки** – це похибки, яка виникають під час статичних вимірювань, у яких вимірювана величина упродовж вимірювального експерименту не змінюється, а також у засобах вимірювальної техніки, що використовуються при вимірюваннях, в яких закінчилися перехідні процеси при поданні на їх вхід вимірюваної величини;

- **динамічні похибки** – це похибки, які виникають під час динамічних вимірювань, в яких вимірювана величина під час вимірювального експерименту може змінюватися, або якщо у застосовуваних ЗВТ ще не закінчилася перехідні процеси при поданні на їх вхід вимірюваної величини;

- **адитивні похибки** – це абсолютні похибки, які не залежать від значення вимірюваної величини, та які ніби то алгебраїчно додаються (від англ. *add* – додавати) до вимірюваної величини;

- **мультиплікативні похибки** – це абсолютні похибки, які лінійно зростають чи зменшуються при збільшенні значення вимірюваної величини, а саме,

є пропорційними до добутку (від англ. *multiplication* – множення) певного коефіцієнту і значення вимірюваної величини;

- **нелінійні похибки** – це абсолютні похибки, які нелінійно залежать від значення вимірюваної величини;

- **сталі (систематичні) похибки** – це похибки, які упродовж здійснення вимірювального експерименту не змінюють свого значення, хоча воно може залишатися невідомим;

- **змінні похибки**, які поділяються на *прогресуючі, регулярні та випадкові*:

- *прогресуючі похибки* – це похибки, які упродовж здійснення вимірювального експерименту практично лінійно змінюють своє значення та мають назву *дрейфи*;

- *регулярні похибки* – це похибки, які під час виконання вимірювального експерименту змінюються регулярно, наприклад, періодично, і закон їх часової зміни може бути дослідженим, визначеним, і такі похибки можуть бути враховані;

- *випадкові похибки* – це похибки, що змінюються в часі нерегулярно, непередбачувано, а їх майбутні значення можна прогнозувати лише з певною часткою ймовірності.

Розрізняють *надмірні похибки й промахи*.

Промахи – це результати вимірювання, які мають надмірні похибки. Причиною промахів є несправність вимірювальних засобів, неправильні дії оператора, стрибкоподібні зміни напруги живлення.

Надмірні похибки – це похибки вимірювання, що суттєво перебільшують очікувані похибки. При оцінюванні результатів вимірювань промахи вилучаються із ряду багаторазових спостережень як аномальні результати вимірювань.

Розглянемо похибки вимірювань більш детально.

Похибки вимірювання за способом вираження поділяються на *абсолютні та відносні*. Як було зазначено вище, **абсолютна похибка (Δ) вимірювання** – це різниця між результатом вимірювання x та істинним значенням вимірюваної величини X_j :

$$\Delta = x - X_j = x - X_o. \quad (4.2)$$

Абсолютна похибка є розмірною величиною, яка має таку ж розмірність, що і величина, що вимірюється. Якщо вимірюють електричну напругу, то абсолютна похибка вимірювання має таку ж розмірність, що й напруга ($V, мВ, кВ$).

Приклад 4.1 Істинне (дійсне) значення струму $I = 10,3 \text{ мА}$, а в результаті вимірювання отримано значення вимірювання струму $10,5 \text{ мА}$, то абсолютна похибка вимірювання струму становить

$$\Delta I = I - I_o = 10,5 - 10,3 = 0,2 \text{ мА}.$$

Така послідовність величин в означенні похибки потрібна для коригування систематичних похибок, зокрема, введення відповідних поправок до результату вимірювань. Коли при вимірюванні говорять «*похибка вимірювання*», то мають на увазі *абсолютну похибку*.

Відносна похибка. Для порівняння якості вимірювань різних значень однієї величини або різних вимірюваних величин абсолютна похибка є незручною. У таких випадках для кількісної характеристики якості вимірювання використовують *відносну похибку*. Теоретично це відношення абсолютної похибки до істинного (дійсного) значення вимірюваної величини, а практично – це відношення до виміряного значення, виражене у відсотках

$$\delta = \frac{\Delta}{X_0} \cdot 100\% \cong \frac{\Delta}{x} \cdot 100\%. \quad (4.3)$$

Чим менша відносна похибка, тим точніше вимірювання і навпаки.

Приклад 4.2 Здійснено вимірювання ємності 0,225 мкФ з похибкою $\Delta C = 0,003$ мкФ і індуктивності 20,1 мГн з похибкою $\Delta L = 0,15$ мГн. Встановити, в якому випадку точність вимірювання краща.

Розв'язання.

1. При вимірюванні ємності відносна похибка дорівнює

$$\delta_C = \frac{\Delta C}{C_0} \cdot 100\% = \frac{0,003}{0,225} \cdot 100\% = 1,33\%.$$

2. Під час вимірювання індуктивності відносна похибка дорівнює

$$\delta_L = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% = \frac{0,15}{20,1} \cdot 100\% = 0,7\%.$$

3. Точність вимірювання індуктивності є найвищою, оскільки відносна похибка вимірювання індуктивності є меншою.

4.3 Систематична та випадкова похибки

Як було зазначено вище, залежно від характеру поведінки в часі розрізняють похибки *сталі систематичні* та *змінні*, які поділяються на *прогресуючі*, *регулярні* та *випадкові*. Найнебезпечнішими є сталі систематичні похибки, так як під час вимірювань вони не проявляються, а при повторних вимірюваннях показ приладу залишається незмінним. Такі похибки важко виявити і їх неврахування може істотно спотворити результат вимірювання. Повністю вилучити систематичні похибки неможливо, так як залишаються невраховані залишки. Залишки необхідно враховувати, щоб оцінити межі невилученої систематичної похибки результату. Для виявлення, оцінки та вилучення систематичних похибок необхідно знати причини виявлення та застосувати способи виявлення і вилучення цих похибок.

Сталі систематичні похибки описують їх граничними значеннями, тобто такими, які може набувати похибка у несприятливих умовах

- абсолютні

$$\Delta_C = \pm\Delta_{ep} \text{ або } -\Delta_{ep} \leq \Delta_C \leq +\Delta_{ep}; \quad (4.4)$$

- відносні

$$\delta_C = \pm\delta_{ep} \text{ або } -\delta_{ep} \leq \delta_C \leq +\delta_{ep}. \quad (4.5)$$

Це означає, що фактичне значення систематичної похибки залишається сталим, але є невідомим та таким, що не виходить за встановлені граничні значення.

Приклад 4.3 При вимірюванні напруги абсолютна систематична похибка задана граничними значеннями $\Delta_{ep} = \pm 0,15B$. Що це означає?

Розв'язання. Це означає, що похибка залишається сталою і невідомою та знаходиться в межах $-0,15B \leq \Delta_C \leq +0,15B$.

Слід визначати, що під час повторних вимірювань систематична похибка кожен раз буде набувати те саме значення із зазначеного діапазону.

Прогресуючі похибки (дрейфи) – це похибки, значення яких упродовж вимірювального експерименту практично лінійно змінюється в часі: зростають чи зменшуються. Вони зумовлені процесами старіння елементів ЗВТ. Слід відзначити, що закон часової зміни похибки є складним та таким, що змінюється за експоненціальним законом, але для простоти описання приймається лінійне наближення часової зміни такої похибки. Таку похибку описують граничними значеннями, які вона може досягати за певний інтервал часу T

- абсолютні

$$\pm \Delta_{ep} / T; \quad (4.6)$$

- відносні

$$\pm \delta_{ep} / T. \quad (4.7)$$

Приклад 4.4 Абсолютна похибка амперметра, границя вимірювання якого $5 A$, в режимі без калібрування може сягати значень $\pm 0,025 A/\text{місяць}$. Що означає цей запис? Знайти допустимі зміни похибки за півмісяця.

Розв'язання. Запис означає, що в найгіршому випадку похибка амперметра за один місяць не перевищить значення $0,025A$ в той чи інший бік. За півмісяця слід очікувати значення систематичної похибки, не більшу, ніж половина граничного значення, саме $\pm 0,0125 A$.

Регулярні похибки – це похибки, які змінюються у часі та протягом майбутнього часу зберігаються, при цьому виникають закономірності, які можна використовувати для зменшення впливу похибок. Похибки, які змінюються за

складними законами, описуються у вигляді часової функції чи графіка, а також можуть вказуватися допустимі відхилення певних характеристик змінної систематичної похибки.

Випадкові похибки обумовлені випадковим характером прояву фізичних процесів у засобах вимірювання й випадковими змінами умов вимірювань, які практично неможливо врахувати.

Основні причини виникнення випадкових похибок:

- конструктивні та технологічні недосконалості вузлів та деталей вимірювальних приладів;
- випадкові коливання параметрів навколишнього середовища;
- нестабільність живлення електронних приладів;
- суб'єктивні помилки оператора;
- вібрації та теплові шуми в електронних приладах;
- часова та просторова нестабільність об'єкта вимірювання.

4.4 Виявлення та виключення систематичних похибок

Обов'язковим елементом опрацювання результатів вимірювання є виявлення і коригування систематичних похибок. Виявлення систематичних похибок є найскладнішою операцією і її ефективність залежить від досвіду та кваліфікації експериментатора, а також від обсягу наявної інформації про об'єкт дослідження, вимірювальні засоби та умови вимірювань.

Універсальних методів виявлення систематичних похибок не існує. Насамперед, аналізується можливість появи методичних похибок, які обумовлені спрощеннями об'єкта моделі і моделі вимірюваної величини та взаємодією засобів вимірювань з об'єктом досліджень. На основі аналізу нормованих метрологічних характеристик ЗВТ та умов вимірювань можна встановити причини і рівень інструментальних систематичних похибок.

Для оцінювання фактичних характеристик додаткових систематичних похибок виконуються додаткові вимірювання впливних величин - температури, вологості, тиску та інтенсивності магнітного поля.

Загальний спосіб виявлення прогресуючої похибки – це виконання двох або трьох зміщених на інтервал часу серій багаторазових вимірювань однієї вимірювальної величини з подальшим визначенням середніх значень окремих серій спостережень. На основі порівняння отриманих середніх значень роблять висновок про наявність чи відсутність прогресуючої похибки.

Для виявлення регулярних похибок застосовується спосіб, який полягає у реєстрації послідовності результатів вимірювань у вигляді графіка з подальшим його аналізом.

Існують типові методи зменшення впливу систематичних похибок вимірювальних приладів, серед них:

- методи коригування сталих у часі систематичних похибок: метод введення поправок до показань приладу, метод зразкових величин, метод заміщення, метод протиставлення;
- методи коригування змінних у часі систематичних похибок: метод симетричних у часі спостережень для корекції прогресуючих похибок та усереднення періодичних похибок;
- аналітичні методи розрахунку та внесення поправок.

Ще одним способом виявлення та усунення постійних систематичних похибок є експериментальне їх визначення з метою визначення їх значень та внесення поправок в результати вимірювання. Інструментальні складові повної систематичної похибки можуть бути виявлені шляхом повірки (калібрування) засобів вимірювань в робочих умовах експлуатації.

Ефективним способом усунення систематичних похибок є застосування спеціальних методів вимірювання, тобто вилучення похибок безпосередньо в процесі вимірювання. Серед них найбільш універсальними є *методи порівняння з мірою*, а саме, *метод заміщення* та *метод протиставлення*. Вони дозволяють вилучити більшість систематичних похибок. За цими методами за допомогою приладу порівняння (компаратора) значення вимірювальної величини порівнюють зі значенням величини, яка відтворюється мірою.

Розглянемо методи порівняння з мірою більш детально.

Метод протиставлення полягає в тому, що вимірювання проводять двічі таким чином, щоб причина похибки першого результату виявляла протилежну дію на результат другого вимірювання. Наприклад, під час першого зважування на рівноплечих вагах маса тіла, що перебуває на одній тарілці, врівноважується гирями, що розташовані на протилежній тарілці. Під час повторного зважування тіло і гирі міняють місцями. Таким чином вилучають похибку від не рівності плечей ваг.

За *методом заміщення* вимірюваний об'єкт замінюють відомою мірою, яка перебуває в тих же умовах. Наприклад, під час вимірювання опору невідомий опір включається в електричне коло (часто для цього використовують мостову схему) і коло врівноважують. Після цього, не змінюючи схеми, вимірюваний об'єкт замінюють магазином опору. За результат вимірювання приймається значення опору магазину, за якого відновлюється рівновага кола. В будь-якому разі при порівнянні з мірою в результат буде входити похибка міри порівняння. Однак, оскільки точність мір зазвичай вища від точності інших засобів вимірювань, ці методи часто забезпечують істотне підвищення точності вимірювання.

В ряді випадків вилучити систематичну похибку можна *способом компенсації за знаком*, суть якого полягає в тому, що вимірювання проводять двічі таким чином, щоб похибка входила в результати з протилежними знаками. Її вилучають, розраховуючи середнє значення. Прикладом може бути вилучення похибки, обумовленої магнітним полем Землі, коли вимірювання проводять двічі, повертаючи прилад перед другим вимірюванням на 180° в горизонтальній площині. До цього способу належить також спосіб вилучення похибки від паразитної термо-ЕРС під час вимірювання напруги потенціометричним методом зі зміною напрямку протікання струму. При цьому полярність напруги буде змінюватись зі зміною напрямку струму, а полярність термо-ЕРС не залежить від його напрямку. Слід зауважити, що усунути повністю систематичну похибку вимірювання неможливо. Таким чином, в кінцевому результаті вимірювання завжди залишається певна систематична похибка, яку часто називають *невилученим залишком систематичної похибки* або просто *невилученою систематичною похибкою*.

Контрольні запитання при вивченні теми 4

- 1 Що таке точність вимірювання?
- 2 Що таке похибка вимірювання?
- 3 Що таке абсолютна та відносна похибки вимірювань?
- 4 Назвіть основні причини виникнення похибок вимірювання?
- 5 Що таке інструментальна та особиста похибки вимірювань?
- 6 Що таке обчислювальна та методична похибки вимірювань?
- 7 Що таке адитивна та мультиплікативна похибки вимірювань?
- 8 Що таке систематична та змінна похибки вимірювань? Як поділяються зміни похибки?
- 9 Що таке випадкова похибка вимірювання?

Список літератури

1. Нестерчук Д.М. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 256 с.
2. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
3. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 656 с.

**ТЕМА 5. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ,
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ,
ВИМІРЮВАЛЬНІ МОСТИ ТА КОМПЕНСАТОРИ (частина 1)**

План лекції

5.1 Вимірювальні перетворювачі електричних величин:

5.1.1 Резистивні перетворювачі

5.1.2 Подільники напруги

5.1.3 Вимірювальні трансформатори струму та напруги

5.1 Вимірювальні перетворювачі електричних величин

5.1.1 Резистивні перетворювачі

Вимірювальний перетворювач – це вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення фізичної величини. В залежності від призначення вимірювальні перетворювачі електричних величин поділяються на групи - рисунок 5.1.

Шунт – це резистивний вимірювальний перетворювач, який призначений для розширення меж вимірювання магнітоелектричних приладів за струмом.

Конструктивно це резистор з чотирма затискачами: струмові затискачі «С» вмикають послідовно в коло вимірюваного струму, а потенціальні затискачі «П» - паралельно до вимірювального механізму чи приладу магнітоелектричної системи з внутрішнім опором $R_{ВМ}$, який переважно працює в режимі мілівольтметра, тобто *шунт є перетворювачем струму в напругу*.

Схеми включення одностороннього шунта та багаторічного шунта подані на рисунку 5.2.

Шунти виготовляють із манганіну у вигляді котушок опору або у формі пластин чи стержнів, запаяних у масивні латунні або мідні наконечники. Шунти поділяються на *внутрішні*, які входять до складу вимірювального кола приладу і розміщені всередині його корпусу, і *зовнішні*, які є самостійними вимірювальними перетворювачами. Внутрішні шунти виготовляють переважно на струми до 30 А, а зовнішні - до 10 кА. Зовнішні шунти поділяються на *універсальні* або *взаємозамінні* та *індивідуальні* або *частково взаємозамінні*. Універсальні шунти можуть використовуватись в комплекті з будь-яким приладом, який має такий самий номінальний спад напруги, як і шунт, а індивідуальні - тільки з конкретними приладами. За призначенням шунти поділяються на *стаціонарні* та *переносні*. Як внутрішні, так і зовнішні шунти можуть бути *одно-* або *багаторічними*.

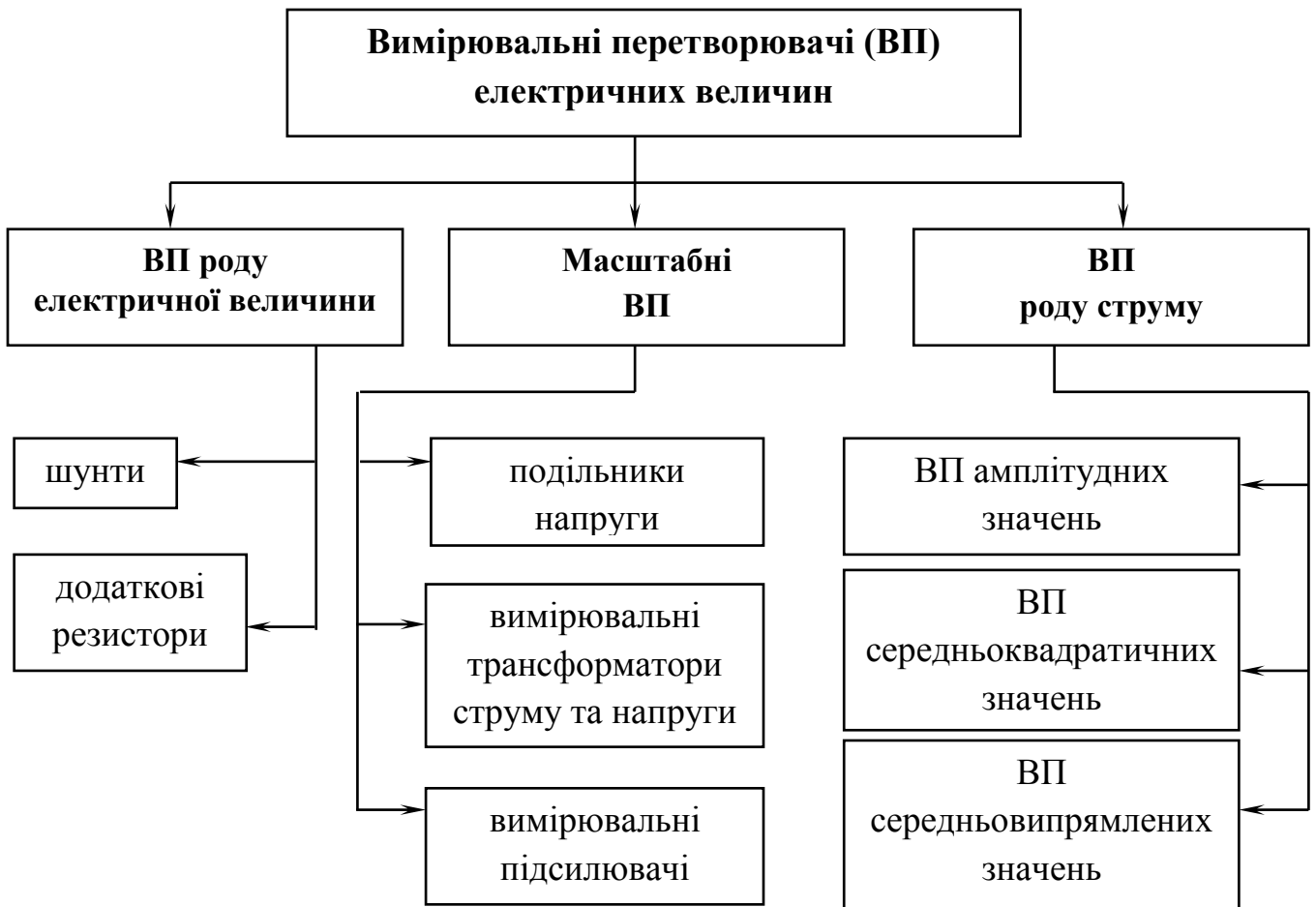
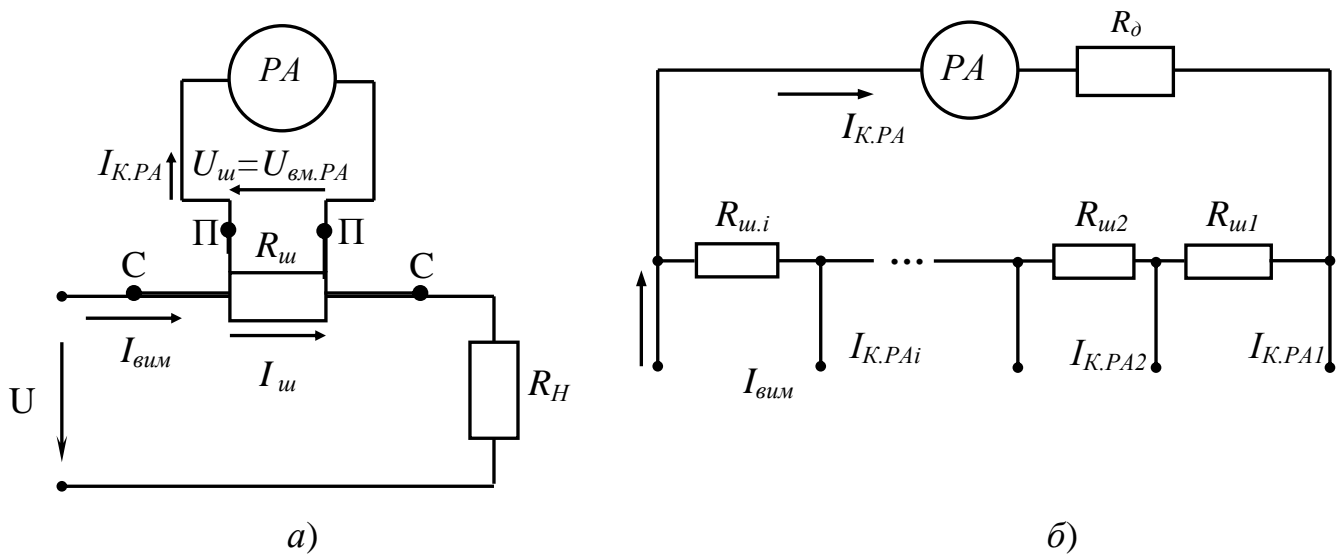


Рисунок 5.1 – Класифікація вимірювальних перетворювачів електричних величин



а - однограничний; б – багатограничний
Рисунок 5.2 – Схеми включення шунта

Аналітично опір однограничного шунта розраховується за формулою

$$R_{ш} = \frac{R_{PA}}{\frac{I_{вим} - 1}{I_{К.РА}} - 1} = \frac{R_{PA}}{p - 1}, \quad (5.1)$$

де R_{PA} - внутрішній опір амперметра, Ом;

$I_{вим}$ - струм, який необхідно виміряти, А;

$I_{К.РА}$ - верхня границя вимірювання амперметра, А;

p - коефіцієнт шунтування, що показує в скільки разів необхідно розширити границю вимірювання приладу.

Опір багатограничного шунта розраховується за формулою

$$R_{ш1} = R_{PA} \cdot \frac{p_1}{p_1 - 1} \cdot \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right); \quad (5.2)$$

$$R_{ш2} = R_{PA} \cdot \frac{p_1}{(p_1 - 1) \cdot p_2}, \quad (5.3)$$

де p_1, p_2 - коефіцієнти шунтування, що показують в скільки разів необхідно розширити границі вимірювання приладу;

$$p_1 = \frac{I_{К.РА1}}{I_{К.РА}}; \quad (5.4)$$

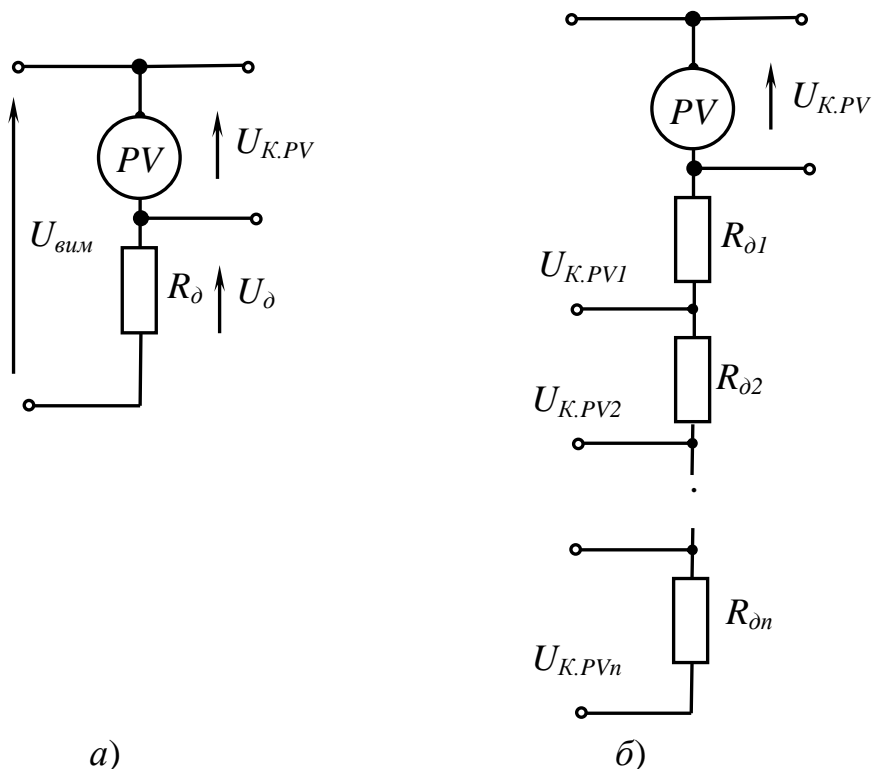
$$p_2 = \frac{I_{К.РА2}}{I_{К.РА}}. \quad (5.5)$$

Основними метрологічними характеристиками шунтів є: номінальне значення опору $R_{шн}$, номінальне значення спаду напруги $U_{шн}$, номінальне значення струму $I_{шн}$ та клас точності. Номінальні значення спаду напруги на шунті $U_{шн}$ можуть дорівнювати 15; 30; 45; 75; 150; 300 мВ, а номінальний струм $I_{шн} = a \cdot 10^n$, де a – одне із чисел 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 7,5; n – ціле число. Похибка внутрішнього шунта – це складова основної похибки приладу, частиною якого є шунт. Зовнішні шунти мають свій клас точності, що позначається одним числом c , яке вибирається зі стандартного ряду класу точності: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5, і що дорівнює границі допустимої відносної основної похибки шунта $\delta_{ш.зр}$

$$\delta_{ш.зр} = \pm \frac{\Delta R_{ш.зр}}{R_{ш.н}} \cdot 100\% = \pm c, \% \quad (5.6)$$

де $\Delta R_{ш.зр}$ – границя допустимої абсолютної похибки шунта, Ом.

Додатковий резистор – це резистивний вимірювальний перетворювач напруги в струм, який вмикається послідовно з вимірювальним механізмом - рисунок 5.3, і призначений для розширення меж вимірювань за напругою вольтметрів магнітоелектричної, електромагнітної та електродинамічної систем, а також приладів, що мають кола напруги: ватметрів, фазометрів.



а) – однограничний; б) – багатограничний
Рисунок 5.3 – Схеми включення додаткового резистора

Додаткові резистори виготовляють з манганінового ізолюваного проводу, намотаного на пластини або каркаси із ізоляційного матеріалу. Високоомні додаткові резистори виготовляють із литого мікропроводу в скляній ізоляції. Додаткові резистори, які призначені для використання на змінному струмі, мають біфілярне намотування для одержання безреактивного опору.

Додаткові резистори поділяються на *внутрішні*, які входять до складу вимірювального кола приладу і розміщені всередині його корпусу, і *зовнішні*, які є самостійними вимірювальними пристроями. Зовнішні додаткові резистори поділяються на *універсальні* або *взаємозамінні* та *індивідуальні* або *частково взаємозамінні*. Внутрішні додаткові резистори виготовляють на номінальні напруги до 600 В, а зовнішні – до 30 кВ. Як внутрішні, так і зовнішні додаткові резистори можуть бути одно- або багато граничними – рисунок 5.3.

За призначенням додаткові резистори поділяються на *переносні та стаціонарні*.

Аналітично опір однограничного додаткового резистора розраховується за формулою

$$R_{\partial} = R_{PV} \cdot \left(\frac{U_{вим}}{U_{K.PV}} - 1 \right) = R_{PV} \cdot (n - 1), \quad (5.7)$$

де R_{PV} - внутрішній опір вольтметра, Ом;

$U_{вим}$ - напруга, яку необхідно виміряти, А;

$U_{K.PV}$ - верхня границя вимірювання вольтметра, А;

n - коефіцієнт, що показує в скільки разів необхідно розширити границю вимірювання приладу.

Опір багатограничного додаткового резистора розраховується за формулою

$$R_{\partial 1} = \frac{U_{вим1} - I_{PV} \cdot R_{PV}}{I_{PV}}; \quad (5.8)$$

$$R_{\partial 2} = \frac{U_{вим2} - U_{вим1}}{I_{PV}}. \quad (5.9)$$

Основними метрологічними характеристиками додаткових резисторів є: номінальне значення опору $R_{\partial n}$, номінальна напруга $U_{\partial n}$, номінальне значення струму $I_{\partial n}$ та клас точності.

Похибка внутрішнього додаткового резистора – це складова основної похибки приладу, частиною якого є додатковий резистор. Зовнішні додаткові резистори мають свій клас точності, що позначається одним числом c , яке вибирається зі стандартного ряду класу точності: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0, і що дорівнює границі допустимої відносної основної похибки додаткового резистора $\delta_{\partial.sp}$

$$\delta_{\partial.sp} = \pm \frac{\Delta R_{\partial.sp}}{R_{\partial.n}} \cdot 100\% = \pm c, \quad \%, \quad (5.10)$$

де $\Delta R_{\partial.sp}$ – границя допустимої абсолютної похибки додаткового резистора, Ом.

5.1.2 Подільники напруги

Подільник напруги – це вимірювальний перетворювач, який призначений для зменшення вимірюваної напруги у задану кількість разів у колах постійного та змінного струму, а також для розширення границі вимірювань за напругою приладів з великим вхідним опором – цифрових вольтметрів, компенсаторів постійного та змінного струму та компараторів напруг.

Основними метрологічними характеристиками подільників напруги є номінальний коефіцієнт поділу $k_{ПН}$, номінальні значення вхідного $R_{ВХ.Н}$ і вихідного $R_{ВИХ.Н}$ опорів, максимальне значення вхідної напруги $U_{ВХ.max}$ та клас точності.

Номинальний коефіцієнт поділу $k_{ПН}$ на постійному струмі визначається за формулою

$$k_{ПН} = \frac{U_{ВХ.Н}}{U_{ВИХ.Н}} = \frac{R_{ВХ.Н}}{R_{ВИХ.Н}}. \quad (5.11)$$

Клас точності подільника напруги позначається одним числом c , яке дорівнює границі допустимої відносної основної похибки подільника напруги $\delta_{ПН.зр}$

$$\delta_{ПН.зр} = \pm \frac{\Delta k_{П.зр}}{k_{ПН}} \cdot 100\% = \pm c, \%, \quad (5.12)$$

де $\Delta k_{П.зр}$ – границя допустимої абсолютної похибки подільника напруги.

Максимальне значення вхідної напруги подільника напруги $U_{ВХ.max}$ – це найбільше значення напруги, яке можна подавати на вхід подільника напруги при певному значенні коефіцієнту поділу.

У вимірювальній техніці застосовують *резистивні, ємнісні та індуктивні подільники напруги*.

Схема одностороннього резистивного подільника напруги наведена на рисунку 5.4.а., коефіцієнт поділу якого дорівнює

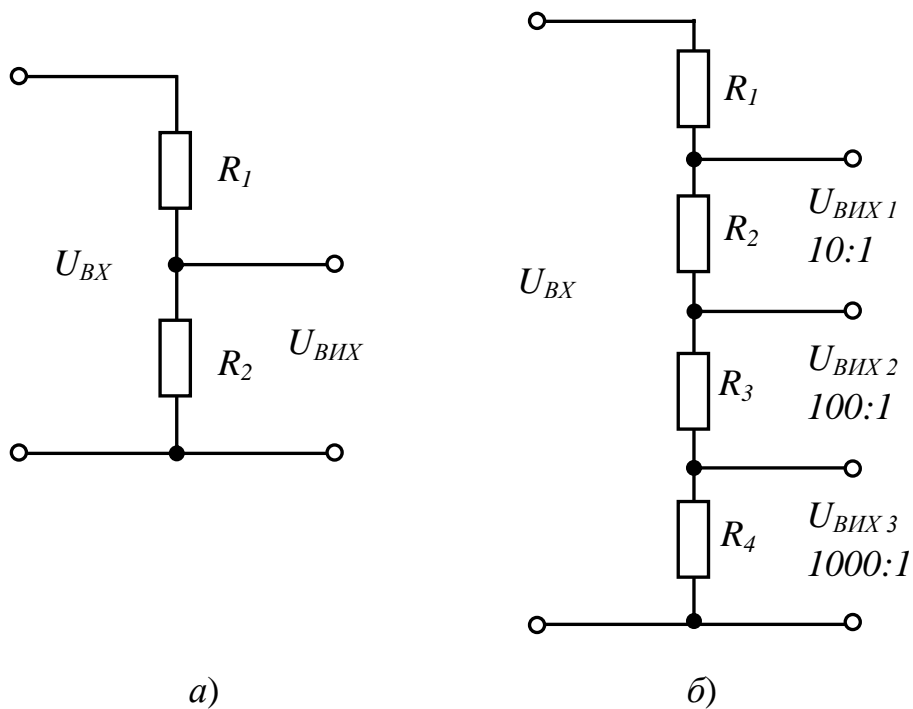
$$k_{П} = \frac{U_{ВХ}}{U_{ВИХ}} = 1 + \frac{R_1}{R_2}. \quad (5.13)$$

На рисунку 5.4.б наведена схема багатороннього резистивного подільника напруги. Резистивні подільники напруги виготовляють із манганінового проводу або мікропроводу у скляній ізоляції, які мають високий питомий опір і малий температурний коефіцієнт опору.

Значення номінального коефіцієнту поділу резистивних подільників дорівнює 10:1; 100:1; 1000:1; 10000:1. Клас точності резистивних подільників вибирається зі стандартного ряду класу точності: 0,0001; 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1, що дорівнює границі допустимої основної похибки відносної похибки подільника

$$\delta_{ПН.зр} = \frac{1}{k_{ПН}} \cdot (\delta_{R1} - \delta_{R2}), \quad (5.14)$$

де δ_{R1} , δ_{R2} – відносні похибки резисторів, які зумовлені відхиленням дійсних значень їх опорів від номінальних.



а) — однограничний; б) — багатограничний
 Рисунок 5.4 - Схеми включення подільників напруги

Ємнісні подільники напруги — це подільники, які здебільшого застосовуються для розширення границь вимірювань електростатичних вольтметрів. Схема ємнісного подільника напруги наведена на рисунку 5.5.

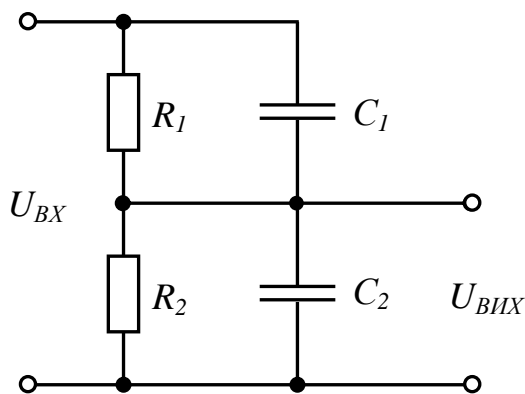


Рисунок 5.5 – Схема ємнісного подільника напруги

Коефіцієнт поділу такого подільника дорівнює

$$k_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{ВХ.Н}}}{U_{\text{ВИХ.Н}}} = \frac{Z_{C1} + Z_{C2}}{Z_{C2}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}. \quad (5.15)$$

Індуктивні подільники напруги (ІПН) – це електромагнітні перетворювачі, які містять одну або декілька обмоток, розміщених на феромагнітному осерді, і призначені для зменшення вхідної напруги у задану кількість разів.

Принцип роботи ІПН оснований на явищі електромагнітної індукції, причому характерною особливістю є наявність між витками обмоток тісного індуктивного зв'язку, коли всі витки обмоток мають однакове потокозчеплення, а потоки розсіювання відсутні. За такої умови відношення напруг, наведених в обмотках подільника, дорівнює відношенню кількості витків відповідних обмоток і не залежить від точності відтворення, стабільності електричних та магнітних параметрів ІПН. Для досягнення високого рівня індуктивного зв'язку між обмотками і зменшення потоків розсіювання в ІПН застосовують мультифілярний спосіб намотування обмоток: обмотки виготовляють у формі джгута із скручених та ізольованих один від одного проводів, який рівномірно намотують на осердя тороїдної форми, виготовлене із матеріалу з високою магнітною проникністю і малими втратами.

За видом зв'язку між обмотками ІПН поділяють на автотрансформаторні та трансформаторні, схеми яких наведені на рисунках 5.6 та 5.7 відповідно.

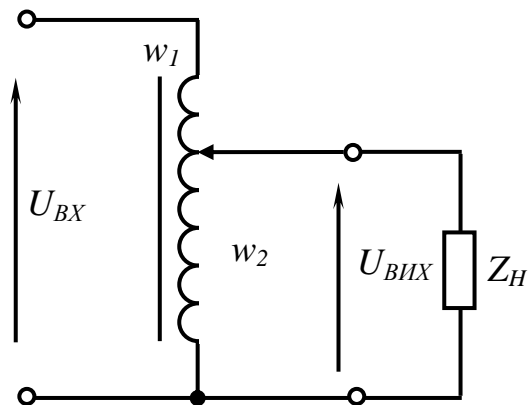


Рисунок 5.6 –
Автотрансформаторна схема
індуктивного подільника напруги

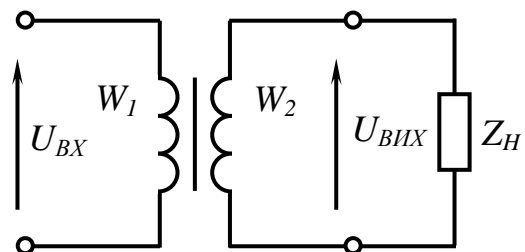


Рисунок 5.7 –
Трансформаторна схема
індуктивного подільника напруги

Номинальний коефіцієнт передачі ІПН – це одна з метрологічних характеристик ІПН, яка дорівнює відношенню вихідної напруги $U_{BИX}$ ненавантаженого вторинного кола подільника до вхідної напруги U_{BX} за формулою

$$k_{\text{передачі}} = \frac{U_{BИX}}{U_{BX}} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (5.16)$$

Індуктивні подільники напруги є поширеними та перспективними перетворювачами, які використовуються як самостійні вимірювальні пристрої, так й як

блоки засобів вимірювальної техніки, а саме, калібраторів напруг постійного і змінного струму, компараторів напруг постійного і змінного струму, цифрових трансформаторних мостів змінного струму.

5.1.3 Вимірювальні трансформатори струму та напруги

Вимірювальний трансформатор - це масштабний електромагнітний перетворювач, який призначений для точного перетворення (трансформації) струму чи напруги, для розширення меж вимірювання приладів, а також для захисту персоналу при вимірюваннях у колах високої напруги.

У вимірювальній техніці застосовують *вимірювальні трансформатори струму (ВТС)* та *вимірювальні трансформатори напруги (ВТН)* для розширення границь вимірювань за струмом та напругою відповідних вимірювальних приладів - амперметрів, вольтметрів, ватметрів, тощо, а також вони дозволяють гальванічно розділити частини вимірювального кола: коло високої напруги від кола вимірювального приладу.

За принципом дії та побудовою вимірювальні трансформатори подібні до силових, але відрізняються від них режимом роботи та способом увімкнення у вимірювальне коло. Вимірювальні трансформатори складаються із двох ізольованих обмоток, які розміщені на феромагнітних осердях – рисунок 5.8.

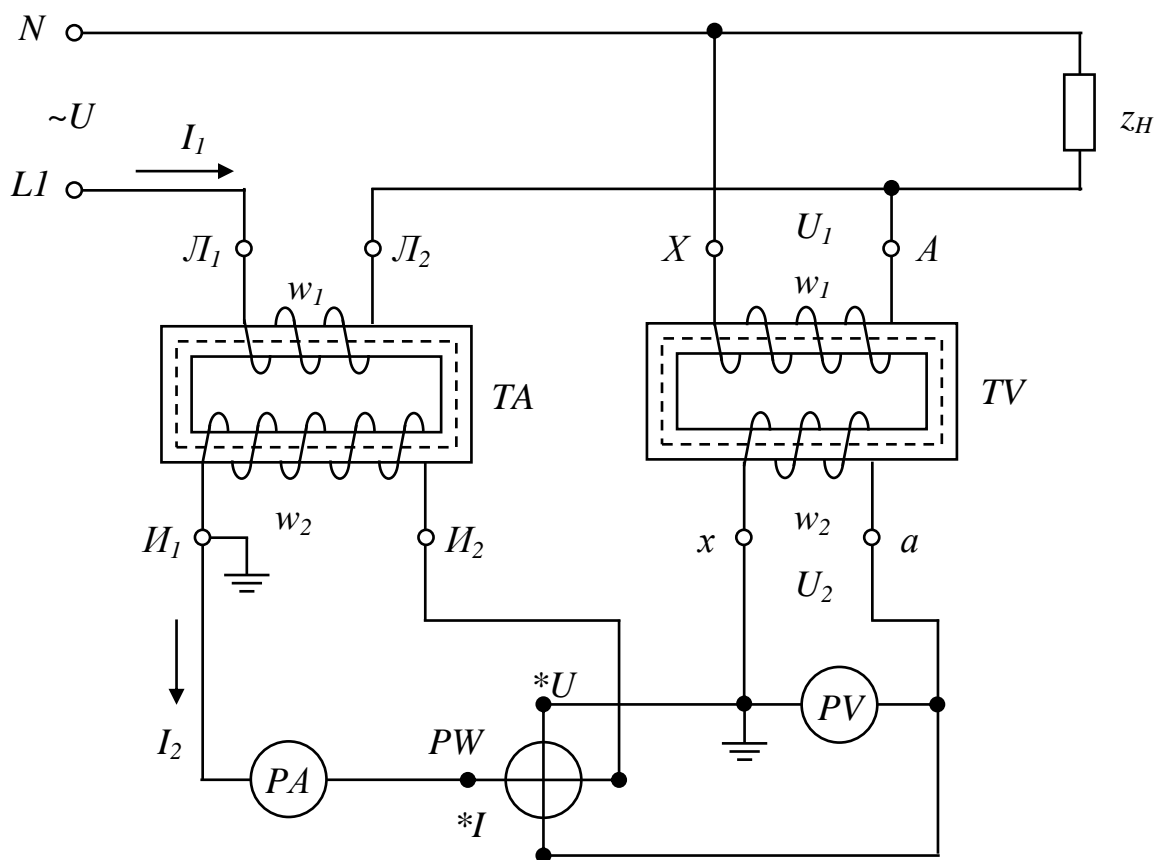


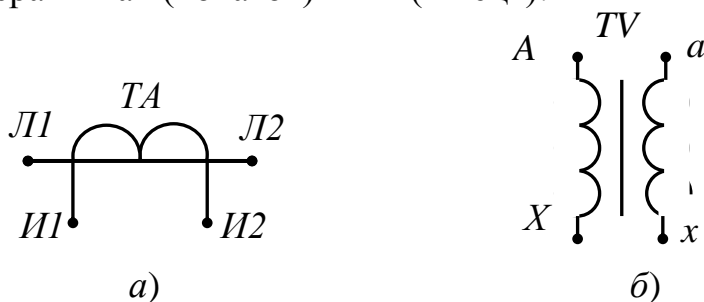
Рисунок 5.8 –Схеми включення амперметра (РА), вольтметра (РВ) та ватметра (РВ) через вимірювальні трансформатори струму (ТА) та напруги (ТВ) до однофазного кола змінного струму

Первинна обмотка має число витків w_1 , вторинна – w_2 . Виводи первинної обмотки підключаються до вимірювальних кіл, а до затискачів вторинної обмотки підключають засоби вимірювання. Вторинні кола вимірювальних трансформаторів заземлюють для безпечної роботи обслуговуючого персоналу.

Первинну обмотку вимірювального трансформатора струму вмикають до вимірювального кола послідовно, а вимірювального трансформатора напруги - паралельно.

Для правильного вмикання вимірювальних трансформаторів їх затискачі мають спеціальні позначення – рисунок 5.9. На рисунку 5.9.а наведено умовне графічне позначення вимірювального трансформатора струму, а на рисунку 5.9.б - умовне графічне позначення вимірювального трансформатора напруги.

Первинну обмотку вимірювального трансформатора струму позначають великими літерами «Л1» (початок) і «Л2» (кінець), а вторинну – «И1» (початок) і «И2» (кінець). Первинну обмотку вимірювального трансформатора напруги позначають великими літерами «А» (початок) і «Х» (кінець), а вторинну - малими літерами «а» (початок) і «х» (кінець).



а – трансформаторів струму; б - трансформаторів напруги

Рисунок 5.9 - Умовні графічні позначення вимірювальних трансформаторів

Вимірювальний трансформатор струму – це масштабний вимірювальний перетворювач, призначений для перетворення вимірюваних струмів в стандартні і, як наслідок, для розширення границь вимірювання амперметрів, обмоток струму ватметрів, лічильників електричної енергії та фазометрів у колах змінного струму. Основними метрологічними характеристиками ВТС є номінальні значення первинного та вторинного струмів, номінальний коефіцієнт трансформації, частота або розширена область частот, клас точності та номінальний опір навантаження вторинного кола.

Номінальний коефіцієнт трансформації ВТС дорівнює відношенню номінального первинного струму I_{1H} , до номінального вторинного струму I_{2H}

$$k_{IH} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (5.17)$$

Номинальні значення первинного струму ВТС вибирають зі стандартного ряду: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 75; 80; 100; 150; 200; ...60000 А.

Номинальні значення вторинного струму ВТС переважно дорівнює 5 А, а також для частоти 50 Гц допустимими є значення 1 А та 2 А.

Клас точності ВТС позначається одним числом c , яке вибирається зі стандартного ряду класу точності: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0.

Первинна обмотка ВТС виконується з проводу, переріз якого залежить від номінального первинного струму I_{HI} . При $I_{HI} \geq 100$ А первинна обмотка – це пряма шина, яка проходить крізь вікно магнітопроводу та якої приєднуються проводи вторинного вимірювального кола. Оскільки опір котушок амперметрів, обмоток струму ватметрів, лічильників електричної енергії, фазометрів невеликий, ВТС працюють в режимі, близькому до режиму короткого замикання, тому кількість приладів у вторинному колі ВТС повинна бути обмежена.

Розглянемо принцип дії вимірювального трансформатора струму більш детально. При проходженні по первинній обмотці струму I_1 в ній створюється сила намагнічування $I_1 \cdot W_1$, яка створює змінний магнітний потік Φ_1 . Цей потік перетинає витки вторинної обмотки, наводить в ній ЕРС E_2 та струм I_2 (якщо прилад підключений до вторинної обмотки). Струм створює силу намагнічування $I_2 \cdot W_2$ та свій магнітний потік Φ_2 . Так як згідно закону Ленца цей потік спрямований назустріч потоку Φ_1 , то сумарний магнітний потік в осерді трансформатора невеликий. Отже, в вторинній обмотці виникає невелика ЕРС, яка викликає появу порівняно невеликого вторинного струму I_2 в практично замкнутій на коротко вторинній обмотці. Слід суворо слідкувати, щоб вторинна обмотка при підключеній до мережі живлення первинній не залишалась розімкнутою, тому що:

- при розмиканні вторинного кола зникає зустрічний магнітний потік Φ_2 ;
- по осердю починає проходити великий змінний потік Φ_1 , який викликає появу великої ЕРС E_2 (до тисячі вольт), так як вторинна обмотка має велику кількість витків;
- наявність такої ЕРС може призвести до пробію ізоляції вторинної обмотки, що є небезпечним для обслуговуючого персоналу;
- великий магнітний потік Φ_1 призводить до появи великих вихрових струмів в магнітопроводі;
- магнітопровід починає нагріватися, починає руйнуватися ізоляція обмоток трансформатора.

Якщо необхідно відімкнути чи замінити прилади у вторинному контурі ВТС, який підключений до мережі, слід спочатку замкнути накоротко вторинну обмотку. Для цього в ВТС передбачаються спеціальні перемички.

ВТС у вимірювальних колах використовують у трьох випадках:

- для зменшення струму у вимірювальному приладі, якщо вимірювальний струм більший, ніж межа вимірювання амперметра або іншого струмового приладу;
- для збільшення струму у вимірювальному приладі, якщо вимірювальний струм менший, ніж межа вимірювання амперметра або іншого струмового приладу;
- для захисту обслуговуючого персоналу і вимірювальних приладів при вимірюваннях у колах високої напруги, причому, у такому разі, номінальний коефіцієнт трансформації ВТС може дорівнювати одиниці.

Значення вимірюваного струму у колі $I_{\text{кола}}$ визначається за формулою

$$I_{\text{кола}} = k_{IH} \cdot I_{2PA}, \quad (5.18)$$

де I_{2PA} – вимірюваний струм за показаннями амперметра.

Приклад 5.1. Визначити номінальний коефіцієнт трансформації ВТС, очікуване показання амперметра у вторинному колі при вимірюванні струму, якщо орієнтовне значення якого дорівнює 45 А.

Розв'язання. Так як орієнтовне значення струму дорівнює 45 А, то з ряду стандартних номінальних первинних струмів обираємо первинний номінальний струм $I_{1H} = 50$ А, а вторинний стандартний номінальний струм дорівнює $I_{2H} = 5$ А, тобто $k_{IH} = 50/5$. Очікуване показання амперметра у вторинному колі буде дорівнювати

$$I_{2PA} = \frac{I_{\text{кола}}}{k_{IH}} ; I_{2PA} = \frac{45}{50/5} = 4,5 \text{ А.}$$

За призначенням ВТС поділяються на *стаціонарні* та *переносні*. Переносні лабораторні трансформатори переважно є *багатограничними* з багатосекційними первинними і вторинними обмотками.

Для вимірювання струму в лінії без її розриву застосовують спеціальні ВТС з роз'ємним осердям, які мають назву *струмовимірювальні кліщі*. Для вимірювань струмів у проводах, які знаходяться під високою напругою, такі ВТС розміщують на кінці довгої ізольованої штанги.

Вимірювальний трансформатор напруги - це масштабний вимірювальний перетворювач, який застосовують для розширення границь вимірювань

за напругою вольтметрів, ватметрів, лічильників електричної енергії та фазометрів у колах змінного струму.

Основними метрологічними характеристиками ВТН є номінальна первинна напруга U_{1H} , номінальна вторинна напруга U_{2H} , номінальний коефіцієнт трансформації, клас точності, номінальне навантаження вторинного кола, частота.

Номінальний коефіцієнт трансформації ВТН дорівнює відношенню номінальної первинної напруги U_{1H} , до номінальної вторинної напруги U_{2H}

$$k_{UH} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (5.19)$$

Номінальне значення первинної напруги ВТН вибирають зі стандартного ряду: $U_{1H} = 100; 127; 150; 220; 380; 500; 1000; 2000; 3000; \dots 750000 \text{ В}$, а *номінальні значення вторинної напруги* $U_{2H} = 100/3; 100/\sqrt{3}; 100; 150; 200/\sqrt{3} \text{ В}; 200 \text{ В}$.

Клас точності ВТН позначається одним числом c , яке вибирається зі стандартного ряду класу точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10.

Вимірювальний трансформатор напруги за своєю будовою та принципом дії аналогічний силовому трансформатору. Обмотка вищої напруги включається до кола паралельно, а до вторинної обмотки з меншим числом витків підключаються вимірювальні прилади. Змінний струм, який протікає по первинній обмотці, призводить до появи в магнітопроводі змінного магнітного потоку. Цей потік перетинає витки обмоток первинної та вторинної напруги створює в них ЕРС E_1 та E_2 . Під впливом E_2 в вторинному колі при підключенні приладів протікає струм, сила якого пропорційна напрузі U_1 .

Характерною особливістю трансформатора напруги є великий опір приладів, що включаются до вторинного кола, унаслідок чого трансформатор напруги працює в умовах, близьких до холостого ходу. ВТН у вимірювальних колах використовуються у разі, коли вимірювальна напруга більша, ніж межа вимірювання вольтметра або іншого вимірювального приладу.

Схема включення вольтметра через ВТН до однофазного кола змінного струму наведена на рисунку 5.10.

Значення вимірюваної напруги кола $U_{\text{кола}}$ визначається за формулою

$$U_{\text{кола}} = k_{UH} \cdot U_{2PV}, \quad (5.20)$$

де U_{2PV} – вимірювана напруга за показаннями вольтметра.

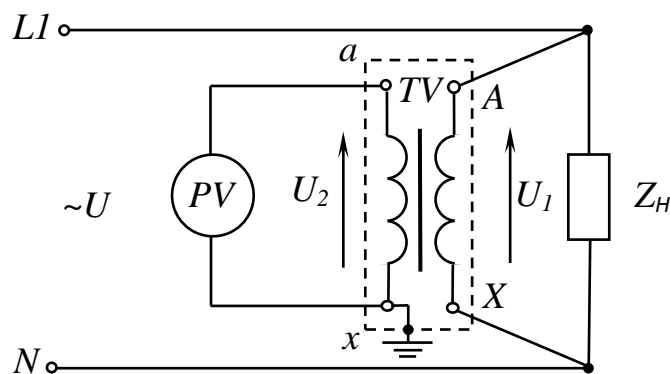


Рисунок 5.10 - Схема включення вольтметра через ВТН до однофазного кола змінного струму

Приклад 5.2. Визначити номінальний коефіцієнт трансформації ВТН, очікуване показання вольтметра у вторинному колі при вимірюванні напруги, орієнтовне значення якої дорівнює 490 В .

Розв'язання. Так як орієнтовне значення напруги дорівнює 490 В , то з ряду стандартних номінальних первинних напруг обираємо первинну номінальну напругу $U_{1H} = 500\text{ В}$, а вторинна номінальна напруга дорівнює $U_{2H} = 100\text{ В}$, тобто $k_{UH} = 500/100$. Очікуване показання вольтметра у вторинному колі буде дорівнювати

$$U_2 = \frac{U_{1H}}{k_{UH}} ; U_2 = \frac{490}{500/100} = 98\text{ В}.$$

Контрольні запитання при вивченні теми 5 (частина 1)

1. Поясніть що таке вимірювальний перетворювач?
2. Що таке шунт? Опишіть його конструктивні особливості.
3. Як аналітично визначаються опір однограничного шунта та опір багатограничного шунта?
4. Наведіть схеми включення однограничного та багатограничного шунтів до кіл постійного струму.
5. Що таке додатковий резистор? Опишіть його конструктивні особливості.
6. Як аналітично визначаються опір однограничного додаткового резистора та опір багатограничного додаткового резистора?
7. Наведіть схеми включення однограничного та багатограничного додаткового резистора до кіл постійного та синусоїдного струму.
8. Що таке подільник напруги? Які існують види подільників напруги?

9. Наведіть схеми включення подільників напруги до кіл постійного та синусоїдного струму.
10. Що таке вимірювальний трансформатор? Опишіть загальну конструкцію вимірювального трансформатора.
11. Охарактеризуйте призначення та конструкцію вимірювального трансформатора струму.
12. Охарактеризуйте призначення та конструкцію вимірювального трансформатора напруги.
13. Як аналітично визначаються номінальні коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів струму та напруги?
14. В яких режимах працюють вимірювальні трансформатори струму та напруги?
15. Опишіть принцип дії вимірювального трансформатора струму?
16. Опишіть принцип дії вимірювального трансформатора напруги?
17. Як схемах умовно позначаються вимірювальні трансформатори струму та напруги?
18. Наведіть схеми включення вимірювальних трансформаторів струму та напруги до кіл однофазного синусоїдного струму.

**ТЕМА 5. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ,
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ,
ВИМІРЮВАЛЬНІ МОСТИ ТА КОМПЕНСАТОРИ (частина 2)**

План лекції

5.2 Електромеханічні вимірювальні прилади

5.2.1 Магнітоелектричні вимірювальні прилади

5.2.2 Електромагнітні вимірювальні прилади

5.2.3 Електродинамічні та феродинамічні вимірювальні прилади

5.2.4 Електростатичні вимірювальні прилади

5.2.5 Індукційні вимірювальні прилади

5.3 Вимірювальні мости та вимірювальні компенсатори

5.2 Електромеханічні вимірювальні прилади

Електромеханічні вимірювальні прилади належать до аналогових засобів вимірювання. *Електромеханічні прилади* – це аналогові вимірювальні прилади, в яких вхідна електрична величина перетворюється в лінійне або кутове переміщення рухомої частини вимірювального механізму. Вони прості, надійні, зручні в експлуатації, недорогі і, в зв'язку, з цими якостями знайшли широке застосування. Такі прилади містять вимірювальне коло, вимірювальний механізм та пристрій відліку. У вимірювальному колі здійснюється кількісне чи якісне перетворення вимірюваної електричної величини в електричну величину, яка діє на вимірювальний механізм та яка зручна для вимірювань. Вимірювальне коло може містити вимірювальні перетворювачі (подільники напруги, шунти, додаткові резистори, вимірювальні трансформатори), які дають змогу розширити границі вимірювань приладів.

Вимірювальний механізм призначений для перетворення електромагнітної енергії сигналу в кут повороту рухомої частини α , та, який містить нерухому та з рухома частини. Рухома частина встановлюється на *кернах*, *розтяжках* та *підвісах*. *Керни* – це два сталеві кускові стержні з загостреними кінцями, які контактують з підп'ятниками, при цьому створюється тертя в опорах. *Розтяжки* та *підвіси* – це стрічечки з пружних матеріалів, при цьому усувається тертя в опорах.

Пристрій відліку містить шкалу з поділками та покажчик (механічний – стрілка або світловий – плямка), який зв'язаний з рухомою частиною вимірювального механізму. Краща об'єктивність відліку показів забезпечується світ-

ловими пристроями відліку, а також стрілочними пристроями з антипаралак-ними елементами (шкала із дзеркалами).

В таблиці 5.1 наведена інформація щодо моментів, які діють на рухому частину вимірювального механізму приладу при її русі.

Таблиця 5.1 – Моменти, що діють на вимірювальний механізм

| Момент | Умови виникнення моменту | Аналітичний вираз |
|---------------------------------|---|--|
| 1.Обертальний момент, $M_{об}$ | Момент створюється електромагнітною енергією W_e та виникає від дії вимірюваної величини і повертає рухому частину на кут α у бік зростання показів | $M_{об} = \frac{dM_e}{d\alpha}$ |
| 2. Протидіючий момент, $M_{пр}$ | Момент виникає в результаті повороту рухомої частини з одночасним закручуванням пружини, яка й створює протидіючий момент, що пропорційний куту повороту α | $M_{пр} = -W_{nm} \cdot \alpha,$ де W_{nm} – питомий протидіючий момент, який виникає при закручуванні пружини на одиницю кута. Знак «мінус» існує, тому що $M_{пр}$ направлений назустріч $M_{об}$. |
| 3. Момент заспокоєння, $M_з$ | Момент характеризує процес гальмування, яке виникає при обертанні рухомої частини механізму в результаті тертя його рухомих частин з повітрям та в результаті електромагнітних процесів | $M_з = -p \frac{d\alpha}{dt},$ де p – коефіцієнт заспокоєння, який залежить від конструкції рухомої частини. |
| 4. Момент тертя, $M_{тр}$ | Момент виникає при встановленні рухомої частини механізму на осі, що закінчуються кернами | $M_{тр} = -\kappa \cdot G^{1.5},$ де p – коефіцієнт пропорційності; G – вага рухомої частини вимірювального механізму. |

Статична рівновага рухомої частини вимірювального механізму при нехтуванні тертя в опорах настає за рівності обертального та протидіючого моментів $M_{об} = M_{пр}$.

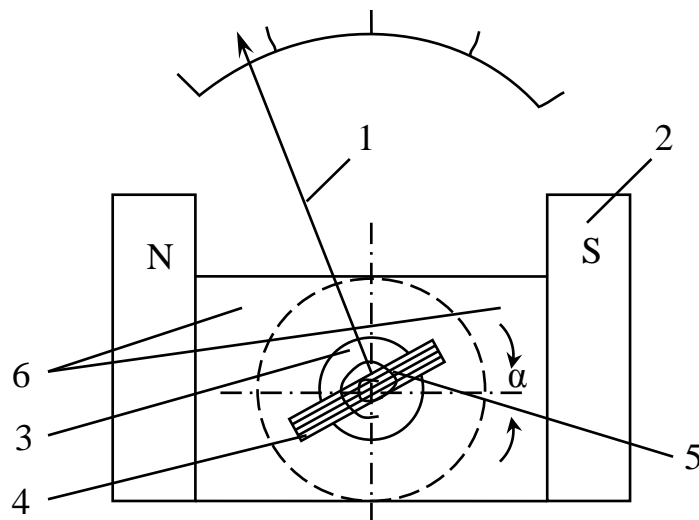
5.2.1 Магнітоелектричні вимірювальні прилади

5.2.1.1 Загальні положення

Принцип дії магнітоелектричних вимірювальних приладів полягає у взаємодії поля постійного магніту з магнітним полем рамки (катушки), по якій протікає вимірюваний струм.

Основні елементи конструкції магнітоелектричного вимірювального приладу наведена на рисунку 5.1.

Постійний магніт, полюсні наконечники і циліндричне осердя – це магнітна система магнітоелектричного вимірювального механізму. В рівномірному проміжку між полюсними наконечниками 6 постійного магніту 2 і осердям 3 створюється сильне радіально-рівномірне магнітне поле, в якому знаходяться дві сторони рухомої катушки 4 з мідної або алюмінієвої проволочки. По виткам катушки протікає постійний струм, який пов'язаний з вимірюваним струмом чи напругою.



1 – стрілочний покажчик; 2 – постійний магніт;

3 – нерухоме циліндричне осердя; 4 - рухома катушка;

5 – дві спіральні пружини; 6 – полюсні наконечники постійного магніту

Рисунок 5.1 – Конструкція магнітоелектричного вимірювального приладу

Цей струм підводиться до катушки через дві спіральні пружини 5. Катушка закріплена між двома напівосями, на одній з яких закріплений стрілочний покажчик 1, кінець якого переміщується над шкалою приладу.

Магнітне поле постійного магніту взаємодіє з тими частинами катушки, що знаходяться в просторі між полюсними наконечниками і осердям, як наслідок, створюється обертальний момент, який намагається повернути катушку так, щоб через площину, охоплену її витками, проходив максимальний магнітний потік. При повороті катушки на кут α закручуються спіральні пружини і створюється протидіючий момент. Поворот катушки припиниться, коли проти-

діючий момент стане рівним обертальному моменту, при такому стані рухомої частини приладу за положенням стрілочного покажчика над шкалою оператором визначається значення вимірюваної величини.

Розглянемо аналітичні залежності, які описують теорію магнітоелектричного приладу:

- обертальний момент $M_{об}$

$$M_{об} = B \cdot S \cdot w \cdot I_o; \quad (5.1)$$

- протидіючий момент

$$M_{пр} = -W_{nm} \cdot \alpha; \quad (5.2)$$

- функція перетворення магнітоелектричного приладу

$$\alpha = \frac{M_o}{W_{nm}} = \frac{B \cdot S \cdot w}{W_{nm}} \cdot I_o = S_I \cdot I, \quad (5.3)$$

де S_I – чутливість магнітоелектричного приладу за струмом

$$S_I = \frac{B \cdot S \cdot w}{W_{nm}}; \quad (5.4)$$

де B – магнітна індукція;

S – активна площа котушки;

w – кількість витків котушки;

I_o – середнє значення струму за період;

W_{nm} – питомий протидіючий момент пружини.

Чутливість S_I є сталою величиною, значення якої визначається тільки геометричними розмірами механізму і не залежить від сили струму I_o , як наслідок, шкала магнітоелектричного приладу є рівномірною.

Порівняно з аналоговими електромеханічними вимірювальними приладами інших систем магнітоелектричні прилади мають такі *переваги*:

- найвищу точність вимірювання на постійному струмі – найвищий клас точності 0,05;

- найвищу чутливість, яка забезпечує широкий діапазон вимірювань струму та напруги;

- найменше споживання потужності (десяті частки Вт), так як у амперметрів малий внутрішній опір, а у вольтметрів внутрішній опір великий;

- рівномірний лінійний характер шкали приладу;

- малий вплив на покази приладів зовнішніх магнітних полів.

До *недоліків* відносять такі параметри: неможливість вимірювання змінних струмів (без додаткових перетворювачів), мала здатність до перевантажень, відносна складність вимірювального механізму.

5.2.1.2 Магнітоелектричні амперметри і вольтметри

Магнітоелектричний вимірювальний механізм при вмиканні безпосередньо у коло постійного струму здатен вимірювати малі постійні струми величиною від 26 до 50 *мА*, тому конструктивно – це *мікроамперметр* та *міліамперметр*.

Для побудови магнітоелектричного амперметра з широким діапазоном вимірювання застосовують *багатограничні шунти*. Шунти на невеликі струми (до кількох десятків ампер) монтується в корпус амперметра, а для великих струмів (до декількох сотень ампер) застосовуються зовнішні шунти.

Для побудови магнітоелектричного вольтметра з широким діапазоном вимірювання застосовують *додатковий резистор*, який приєднується послідовно з котушкою вимірювального механізму та який обмежує струм в котушці до припустимих значень. Додаткові резистори (опори), як і шунти, можуть бути внутрішніми (напруга 600 *В*) та зовнішніми (напруга від 600 *В* до 30 *кВ*).

5.2.1.3 Магнітоелектричні омметри

Омметри з магнітоелектричним вимірювальним механізмом побудовані за двома схемами: з *послідовним* (рисунок 5.2.а) і з *паралельним* (рисунок 5.2.б) вмиканням вимірювального опору R_x з вимірювальним механізмом (ВМ) приладу. У схемі (див. рисунок 5.2.а) вимірювальний опір R_x з'єднаний послідовно з вимірювальним механізмом магнітоелектричної системи з внутрішнім опором R_{BM} , тому то струм вимірювального механізму I_{BM} дорівнює

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM} + R_x}, \quad (5.5)$$

якщо $R_x = 0$, то $I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM}} = I_{max}$; якщо $R_x = \infty$, то $I_{BM} = 0$,

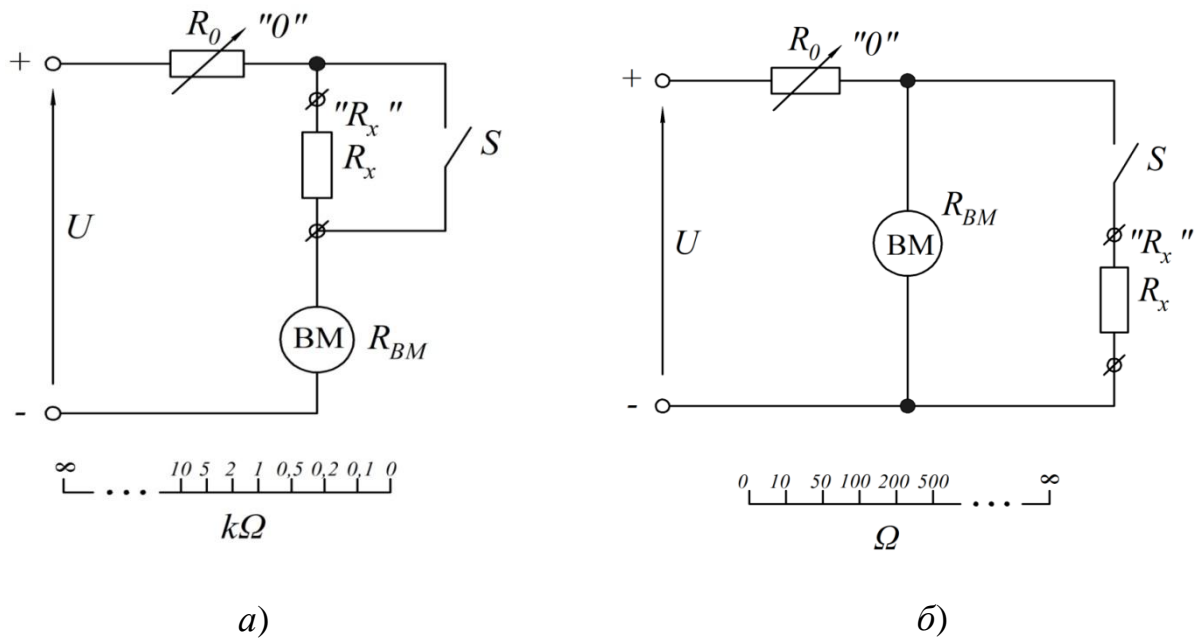
де U – напруга джерела живлення;

R_0 – опір резистора регулювання.

Резистор регулювання R_0 призначений для встановлення нульового показу омметра «0» при закорочених вхідних затискачах « R_x » за допомогою перемикача S .

Тому то, якщо $U = const$, струм I_{BM} є функцією величини R_x , шкала приладу є обернена та є істотно нелінійною (нерівномірною), а максимальна чутливість схеми забезпечується за умови

$$R_x \gg R_{BM}. \quad (5.6)$$



а) - з послідовним вмиканням; б) - з паралельним вмиканням
 Рисунок 5.2 – Схеми магнітоелектричних омметрів

Висновок: така схема з послідовним з'єднанням опору R_x і вимірювального механізму застосовується для вимірювання великих опорів, тобто для побудови мегомметрів.

У схемі (див. рисунок 5.2.б) вимірювальний опір R_x з'єднаний паралельно з вимірювальним механізмом магнітоелектричної системи з внутрішнім опором R_{BM} , тому то струм вимірювального механізму I_{BM} дорівнює

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM} + \frac{R_0 \cdot R_{BM}}{R_x}}, \quad (5.7)$$

якщо $R_x = 0$, то $I_{BM} = 0$; якщо $R_x = \infty$, то $I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM}} = I_{max}$.

Тому то, якщо $U = const$, струм I_{BM} також є функцією величини R_x , шкала приладу є пряма та є істотно нелінійною (нерівномірною), а максимальна чутливість схеми забезпечена за умови

$$R_x \ll R_{BM}. \quad (5.8)$$

Висновок: така схема з паралельним з'єднанням опору R_x і вимірювального механізму застосовується для вимірювання великих опорів, тобто для побудови міліомметрів та омметрів.

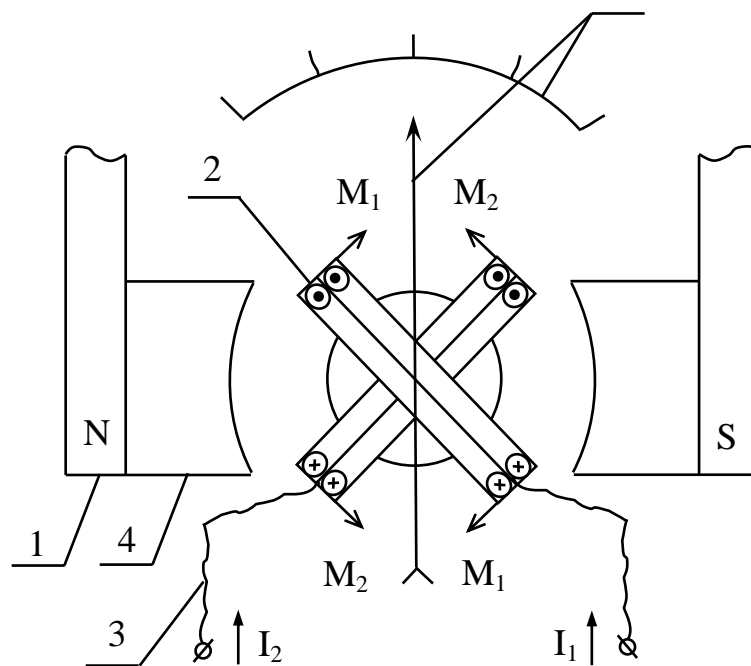
Омметри з магнітоелектричним вимірювальним механізмом виготовляються переносними з живленням від сухих елементів. У процесі експлуатації напруга на затискачах сухих елементів змінюється і може відрізнятись від тієї,

яка була при заводському градуванні приладу. Тому перед кожним вимірюванням в омметрі з послідовною схемою при натиснутому перемикачі S потрібно встановлювати стрілочний показчик на нульову позначку шкали зміною опору R_0 , а в омметрі з паралельною схемою необхідно встановити стрілочний показчик на нульову позначку шкали при непідключеному R_x . Це є недоліком омметрів з магнітоелектричним вимірювальним механізмом.

Такого недоліку не мають омметри з *логометричним вимірювальним механізмом*. На рисунку 5.3 наведена конструкція магнітоелектричного логометричного вимірювального механізму омметра.

В магнітоелектричному логометричному вимірювальному механізмі в полі постійного магніту обертаються дві котушки, які жорстко скріплені між собою. Протидіючих пружинок в такому механізмі немає. Струм підводиться до котушок через тонкі стрічечки.

Проміжок між осердям та полюсними наконечниками нерівномірний, магнітне поле у проміжку також є нерівномірним. Струм I_1 та I_2 , які протікають в котушках, створюють два обертальні моменти M_1 та M_2 , які направлені назустріч один одному, та під дією цих моментів рухома частина повертається на кут α .



- 1 – постійний магніт; 2 – дві рухомі котушки, жорстко скріплені між собою;
- 3 – струмовідводи: тонкі стрічечки;
- 4 – полюсні наконечники постійного магніту;
- 5 – стрілочний показчик та шкала

Рисунок 5.3 – Конструкція омметра з магнітоелектричним логометричним вимірювальним механізмом

Так як поле нерівномірне, то при повороті рухомої частини один з моментів збільшується, а інший – зменшується і при певному куті повороту моменти стають рівними один одному, тому то рухома частина механізму зупиняється. Особливістю таких омметрів є те, що при відсутності струмів у котушках рухома частина може знаходитись у вільному положенні на шкалі приладу.

На рисунку 5.4 наведена схема логометричного омметра, в якій вимірюваний опір R_x з'єднаний послідовно опором R_{BM1} однієї з котушок. Струми у колах котушок логометра дорівнюють

$$I_1 = \frac{U}{R_{BM1} + R_x}; \quad I_2 = \frac{U}{R_{BM2} + R_0}. \quad (5.9)$$

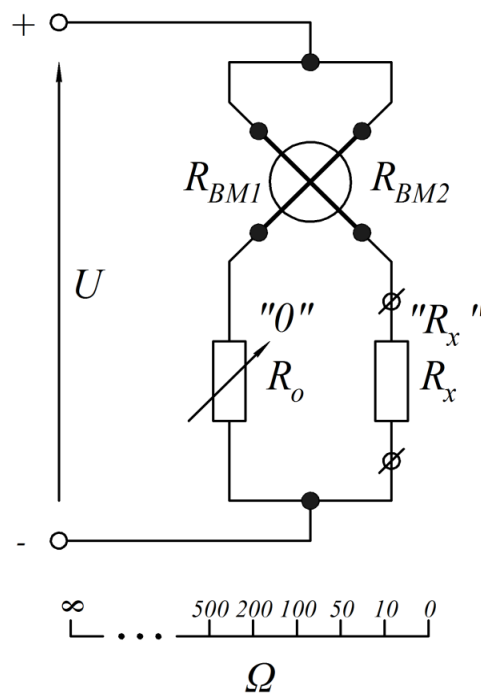


Рисунок 5.4 – Схема омметра з логометричним вимірювальним механізмом

Кут відхилення рухомої частини логометра визначається відношенням струмів у котушках (від грецької «логос» - відношення).

Рівняння шкали омметра має вигляд

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_{BM2} + R_0}{R_{BM1} + R_x}\right) = f(R_x). \quad (5.10)$$

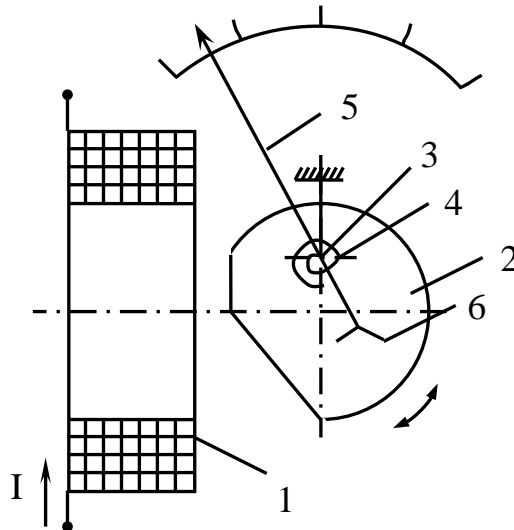
Як видно з виразу (5.10), покази омметра з логометричною схемою не залежать від напруги джерела живлення, але шкала обернена і також істотно нелінійна.

5.2.2 Електромагнітні вимірювальні прилади

5.2.2.1 Загальні положення

Принцип дії електромагнітних вимірювальних приладів оснований на взаємодії магнітного поля, яке створюється струмом в нерухомій котушці з рухомих феромагнітним осердям.

Основні елементи конструкції електромагнітного вимірювального приладу наведені на рисунку 5.5.



1 – нерухома котушка; 2 – феромагнітне осердя; 3 – ось; 4 – дві спіральні пружини; 5 – стрілочний покажчик; 6 – повітряний заспокоювач

Рисунок 5.5 – Конструкція електромагнітного вимірювального приладу

Під час проходження через котушку вимірюваного струму I виникає магнітне поле, яке втягує осердя всередину котушки, і обертання рухомої частини триває доти, доки обертальний момент стане рівним протидіючому моменту спіральних пружинок, при такому стані рухомої частини приладу за положенням стрілочного покажчика над шкалою оператором визначається значення вимірюваної величини. Особливість конструкції приладу: струм підводиться безпосередньо до нерухомої котушки, провід обмотки має великий переріз, тому електромагнітний механізм здатний витримувати великі перевантаження.

Розглянемо аналітичні залежності, які описують теорію електромагнітного приладу:

- обертальний момент $M_{об}$

$$M_{об} = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2; \quad (5.11)$$

- протидіючий момент

$$M_{np} = W_{nm} \cdot \alpha; \quad (5.12)$$

- функція перетворення електромагнітного приладу

$$\alpha = \frac{1}{W_{nm}} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2, \quad (5.13)$$

де W_{nm} – питомий протидіючий момент пружини;

$\frac{dW_m}{d\alpha}$ - швидкість зміни електромагнітної енергії при переміщенні осердя на

кут α ; і

$\frac{dL}{d\alpha}$ - швидкість зміни індуктивності котушки при переміщенні осердя на кут

α .

Із виразу (5.13) можна зробити висновок, що кут повороту рухомої частини α пропорційний до квадрата діючого (середньоквадратичного) значення струму. Величина I^2 завжди є додатна, тому то кут повороту рухомої частини не залежить від напрямку струму в котушці. Отже, електромагнітні прилади можуть застосовуватись для вимірювань як у колах постійного, так і в колах змінного струму, але їх шкали мають нелінійний (нерівномірний) характер.

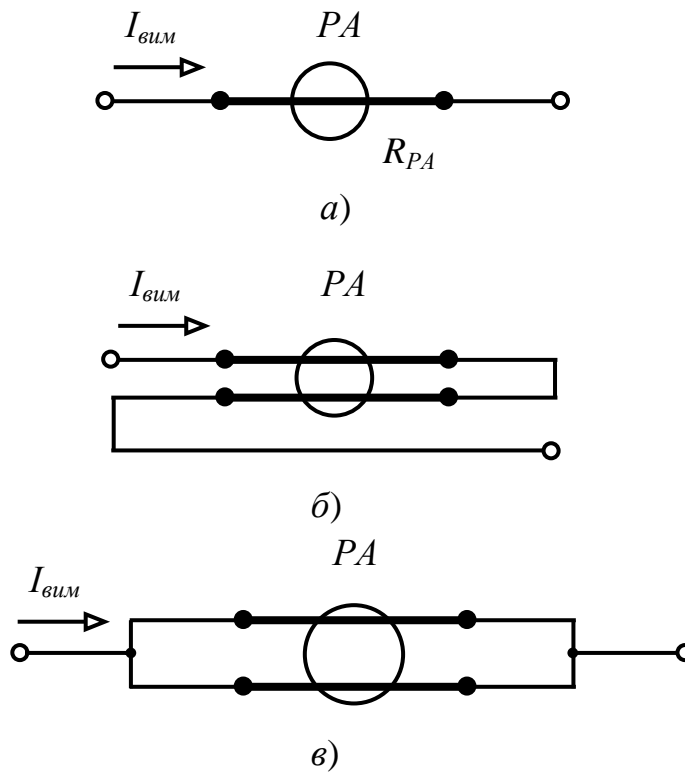
Методом підбору спеціальної конструкції рухомого осердя конструктори досягли такої залежності $\frac{dL}{d\alpha}$, за якої шкала приладу стала близької до лінійної в діапазоні 20...100 % всієї її довжини, але початкова ділянка шкали 0...20%, яка відмічена спеціальною точкою, є неробочою частиною шкали і такою, що не входить в діапазон вимірювання.

5.2.2.2 Електромагнітні амперметри і вольтметри

В електромагнітних амперметрах весь вимірюваний струм проходить по обмотці нерухомої котушки. Найбільш поширені амперметра з верхньою границею вимірювання $5 A$, так як для розширення границь вимірювання використовують вимірювальні трансформатори струму, у яких номінальне значення вторинного струму дорівнює $5 A$. В залежності від граничного значення вимірюваного струму вибирається переріз проводу та число витків обмотки котушки вимірювального механізму. Так, в амперметрах на номінальні струми від $100 A$ та більше котушка має один виток з товстої мідної шини. Максимальне номінальне значення струму електромагнітних амперметрів прямого вмикання – $200 A$, мінімальне значення струму – $5 mA$.

Схеми електромагнітних амперметрів наведені на рисунку 5.6.

Як видно, з рисунку 5.6.а, амперметри є щитовими однограничними, з рисунку 5.6.б, амперметри є переносними багатограничними, так як обмотки їх 2-х або 4-х секційні, а при переключенні секцій з послідовного з'єднання на паралельне досягають різних границь вимірювань амперметрів – рисунок 5.6.в.



- а - однограничний щитовий амперметр;
 б - переносний багатограничний 2-х секційний амперметр;
 в - багатограничний амперметр при переключенні секцій з послідовного з'єднання на паралельне

Рисунок 5.6 – Схеми електромагнітних амперметрів

Для розширення меж вимірювання амперметрів для вимірювання великих струмів шунти не застосовуються, так як опір котушки механізму невеликий, а опір шунта в n – разів менший за опір обмотки, тому шунти мають великі розміри. Для одержання різних меж вимірювання електромагнітних вольтметрів послідовно з котушкою механізму вмикаються додаткові опори, які виконані з манганіну та характеризуються малою залишковою реактивністю. У багатограничних вольтметрах додаткові резистори є секційними.

Розширення меж вимірювання вольтметрів до високих напруг здійснюється за допомогою вимірювальних трансформаторів напруги.

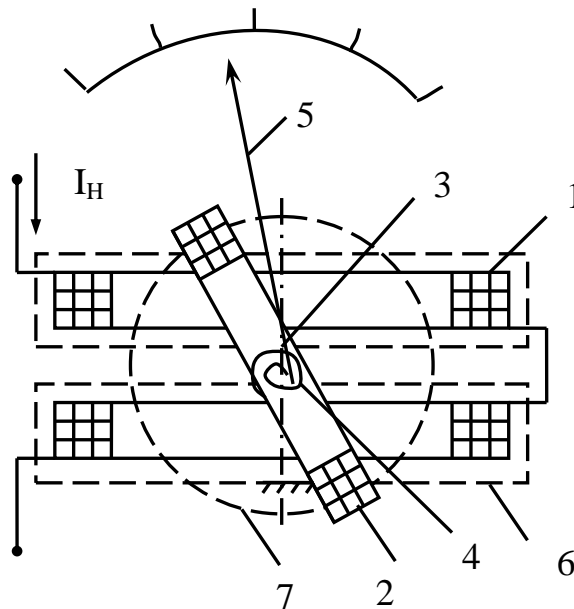
Як видно із вищенаведеного, до переваг електромагнітних приладів належить простота і надійність конструкції, висока здатність до перевантажень, можливість використання для вимірювань у колах змінного, так і постійного струму, а до недоліків належать низька чутливість і точність, велика варіація показів на постійному струмі із-за гістерезисних явищ у феромагнітному осердді, велике власне споживання потужності, великий вплив зовнішніх магнітних полів внаслідок слабкого власного магнітного поля та вузький частотний діапазон.

5.2.3 Електродинамічні та феродинамічні вимірювальні прилади

5.2.3.1 Загальні положення

Принцип дії електродинамічного вимірювального механізму оснований на взаємодії полів двох котушок із струмами: нерухомої 1 та рухомої 2.

Основні елементи конструкції електродинамічного вимірювального приладу наведена на рисунку 5.7.



- 1 – нерухома двохсекційна котушка; 2 – рухома котушка; 3 – ось;
4 – дві спіральні пружини; 5 – стрілочний покажчик;
6, 7 – осердя (для феродинамічного вимірювального механізму)

Рисунок 5.7 – Конструкція електродинамічного та феродинамічного вимірювального приладу

Нерухома котушка розділена на дві частини для функціонування більш рівномірного магнітного поля. Рухома котушка закріплена на осі або розтяжках і знаходиться в полі нерухомої. Струм до неї підводиться через спіральні пружини або розтяжки, які при повороті рухомої котушки створюють протидіючий момент. При протіканні струмів через обмотки котушок виникає пара сил, яка створює обертальний момент, що намагається повернути рухома котушка так, щоб магнітні потоки котушок збіглися.

Розглянемо аналітичні залежності, які описують теорію електродинамічного приладу

- обертальний момент

$$M_{об} = k \cdot I_{H.к} \cdot I_{P.к} \cdot \cos \psi \frac{dM_{H.к, P.к}}{d\alpha}; \quad (5.14)$$

- протидіючий момент

$$M_{np} = \alpha \cdot W; \quad (5.15)$$

- функція перетворення електромагнітного приладу

$$\alpha = \frac{I_{H.k} \cdot I_{P.k}}{W_{nm}} \cos \psi \frac{dM_{H.k,P.k}}{d\alpha} = S \cdot I_{H.k} \cdot I_{P.k} \cdot \cos \psi, \quad (5.16)$$

де $I_{P.k}$, $I_{H.k}$ – струми рухомої та нерухомої котушок відповідно;

W_{nm} – питомий протидіючий момент пружини;

k – конструктивна стала приладу;

ψ – кут зсуву фаз між векторами струмів $I_{P.k}$ та $I_{H.k}$;

$\frac{dM_{H.P}}{d\alpha}$ – швидкість зміни взаємної індуктивності двох котушок при перемі-

щенні рухомої котушки на кут α .

Феродинамічні вимірювальні механізми за суттю є різновидом електродинамічних, від яких вони відрізняються не за принципом дії, а конструктивно. Для збільшення магнітних потоків нерухомої та рухомої котушок всередині них розміщують магнітопроводи (осердя) з магнітом'якого матеріалу (рисунок 5.7): нерухома котушка 1 розміщується на осерді 6, а всередині рухомої котушки 2 знаходиться осердя 7.

Завдяки наявності магнітопроводів значно збільшується обертальний момент, зростає чутливість механізму, і може бути зменшене власне споживання потужності механізму.

Внаслідок сильного власного поля феродинамічного механізму різко знижується вплив зовнішніх магнітних полів. Але наявність магнітопроводів збільшує похибку приладів через вихрові струми та гістерезис, а також через нелінійність залежності індукції від напруженості магнітного поля.

Магнітне поле електродинамічного механізму, силові лінії якого замикаються в повітрі, невелике. Зовнішні магнітні поля викликають додаткові обертальні моменти від взаємодії цих полів з полем рухомої котушки.

Внаслідок цього виникають додаткові похибки. Для захисту електродинамічного механізму від зовнішніх магнітних полів їх поміщають в феромагнітні екрани або механізм виготовляють у вигляді *астатичної конструкції*.

Астатичний механізм складається з двох звичайних електродинамічних механізмів, рухомі котушки яких закріплені на деякій відстані одна від одної на одній осі. Магнітні поля нерухомих котушок направлені взаємно протилежно. Протилежно направлені також і поля рухомих котушок, тому обертальні моменти обох механізмів направлені однаково відносно спільної осі.

Але зовнішнє поле з полем одного механізму складається, а від поля іншого – віднімається. Результуючий додатковий момент від зовнішнього поля дорівнює нулю.

Основними перевагами електродинамічних механізмів є однакові покази на постійному та змінному струмах, що дозволяє з великою точністю градувати їх на постійному струмі, а також стабільність показів у часі.

Важливою перевагою цих механізмів є можливість побудови на їх основі ватметрів. Це механізми не мають феромагнітних осердь, що виключає появу похибки від вихрових струмів та гістерезису, тому то це прилади високих класів точності (0,1; 0,2; 0,5) для вимірювання на постійному та змінному струмах.

Недоліки електродинамічних вимірювальних механізмів: невисока чутливість, велике власне споживання потужності та чутливість до перевантажень.

5.2.3.2 Амперметри і вольтметри електродинамічної системи

Електродинамічний амперметр

Електродинамічний вимірювальний механізм виконує функції амперметра при підключенні двох котушок послідовно, і, як наслідок, через них протікає весь вимірюваний струм.

Послідовне з'єднання котушок використовується в амперметрах, розрахованих на малі струми (від 1 мА до 0,5 А) – рисунок 5.8.

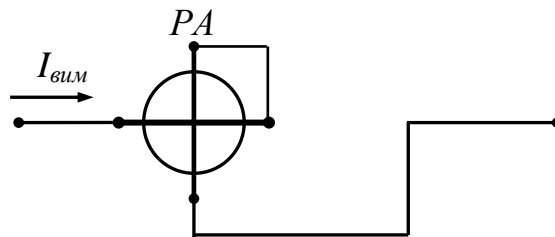


Рисунок 5.8 – Схема послідовного з'єднання котушок електродинамічного амперметра

При великих струмах (до 10 А) котушки з'єднуються паралельно - рисунок 5.9.

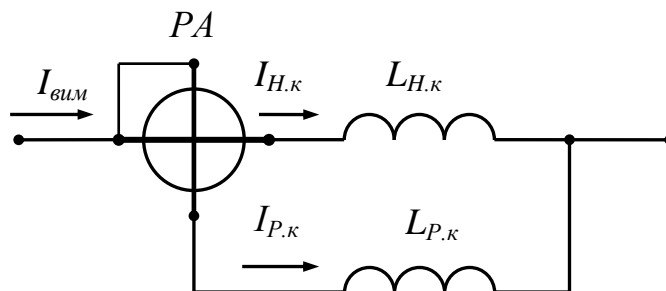


Рисунок 5.9 – Схема паралельного з'єднання котушок електродинамічного амперметра

Опори R_1 та R_2 та індуктивності L_1 та L_2 підбирають такими, щоб, по-перше, струм через рухому котушку, який підводиться через спіральні пружини, не перевищував припустимого значення, а по-друге, щоб зсув фаз між струмами I_1 та I_2 дорівнював нулю.

Функція перетворення електродинамічного амперметра має вигляд

$$\alpha = \frac{k}{W_{nm}} \cdot I^2 \cdot \frac{dM_{H.K,P.K}}{d\alpha} = S_I \cdot I, \quad (5.17)$$

де S_I – чутливість амперметра

$$S_I = \frac{k}{W_{nm}} \cdot \frac{dM_{H.K,P.K}}{d\alpha}. \quad (5.18)$$

Крім того, включення в коло опорів R_1 та R_2 і індуктивностей L_1 та L_2 потрібне для компенсації частотної й температурної похибок.

Для одержання амперметрів з декількома межами вимірювання нерухому котушку виготовляють секційною (найчастіше з двох секцій для одержання двох меж). Для вимірювання струмів більше 10 А використовуються вимірювальні трансформатори струму. Максимальна частота для електродинамічних амперметрів – 10 кГц.

Електродинамічний вольтметр

У електродинамічних вольтметрах нерухома та рухома котушки з'єднані послідовно разом з додатковим резистором R_δ - рисунок 5.10.

У багатограничних вольтметрах застосовують декілька додаткових резисторів, з'єднаних послідовно.

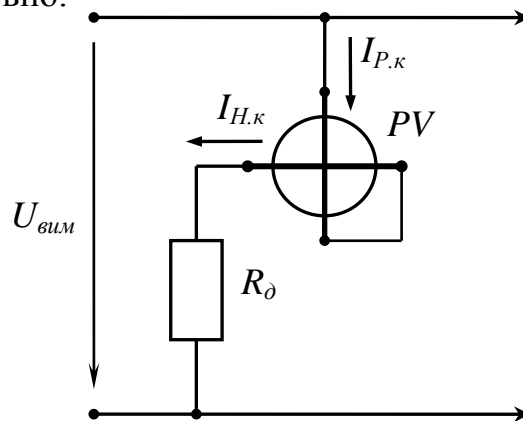


Рисунок 5.10 - Схема з'єднання котушок електродинамічного вольтметра

Функція перетворення електродинамічного вольтметра має вигляд

$$\alpha = \frac{k}{W_{nm} \cdot R_{PV}^2} \cdot U^2 \cdot \frac{dM_{H.K,P.K}}{d\alpha} = S_U \cdot U^2, \quad (5.19)$$

де S_U – чутливість вольтметра.

$$S_U = \frac{k}{W_{nm} \cdot R_{PV}^2} \cdot \frac{dM_{H.к, P.к}}{d\alpha}, \quad (5.20)$$

де R_{PV} – повний опір вольтметра.

$$R_{PV} = R_U + R_\delta, \quad (8.21)$$

де R_U – опір рухомої котушки вольтметра;

R_δ – опір додаткового резистора.

Вольтметри електродинамічної системи застосовуються при безпосередньому їх вмиканні для вимірювання напруг від 1,5 до 600 В, при значенні струму повного відхилення від 3 до 60 мА.

Для вимірювання напруг більше 600 В застосовуються вимірювальні трансформатори напруги.

5.2.3.3 Ватметри і варметри електродинамічної системи

В електродинамічному вимірювальному механізмі ватметра нерухома котушка під'єднується послідовно до навантаження, а рухома котушка – через додатковий резистор паралельно до нього.

При такій схемі забезпечується рівність струму через одну із котушок і струму навантаження, пропорційність струму через іншу котушку напрузі на навантаженні, рівність зсуву фаз між струмами та зсуву фаз між напругою та струмом на навантаженні.

На рисунку 5.11 наведена схема підключення котушок ватметра до навантаження. Ватметр за такою схемою вмикається для вимірювання активної потужності в колах постійного струму або в однофазних колах змінного струму.

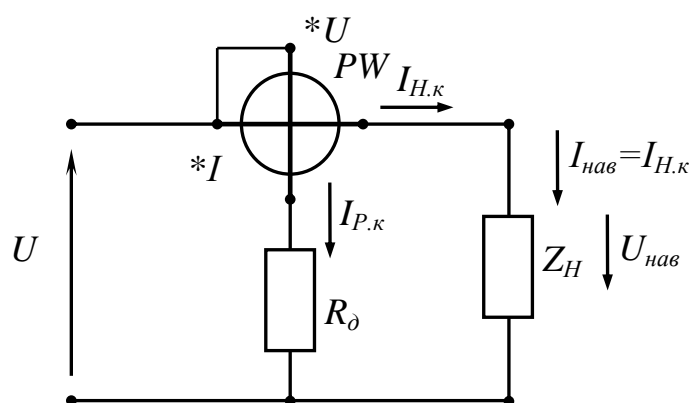


Рисунок 5.11 - Схема підключення котушок ватметра до навантаження

Зірочка та літера $*I$ на схемі та на корпусі ватметра умовно позначають початок нерухомої котушки (струмової обмотки) ватметра. Зірочка та літера $*U$ на схемі та на корпусі ватметра умовно позначають початок рухомої котушки

(обмотки напруги) ватметра. При зворотному вмиканні хоча б однієї з обмоток стрілочний показчик приладу відхиляється вліво за нульову позначку шкали.

Функція перетворення електродинамічного ватметра, який увімкнений в коло постійного струму, має вигляд

$$\alpha = \frac{k}{W_{nm} \cdot R_{обмU}} \cdot U \cdot I \cdot \frac{dM_{H.K,P.K}}{d\alpha} = S_P \cdot P, \quad (5.22)$$

де S_P – чутливість ватметра;

$$S_P = \frac{k}{W_{nm} \cdot R_{обмU}} \cdot \frac{dM_{H.K,P.K}}{d\alpha}. \quad (5.23)$$

При використанні ватметра в колах змінного струму із-за наявності індуктивності $L_{обм.U}$ рухомої котушки струм $I_{P.K}$ в колі напруги ватметра відстає від вектора прикладеної напруги мережі U на кут δ_{PW} , який дорівнює

$$\delta_{PW} = \arctg \frac{\omega L_{обм.U}}{R_{обм.U}}. \quad (5.24)$$

Функція перетворення ватметра на змінному струмі має вигляд

$$\alpha = \frac{1}{W_{nm}} \cdot \frac{dM_{H.K,P.K}}{d\alpha} \cdot I_{H.K} \cdot I_{P.K} \cdot \cos(\varphi - \delta_{PW}), \quad (5.25)$$

де φ – кут фазового зсуву між струмом і напругою на навантаженні.

Залежність кута повороту α рухомої частини електродинамічного механізму від кута фазового зсуву φ між струмом та напругою на навантаженні використовують для побудови спеціальних приладів для вимірювання *реактивної потужності – варметрів*. На рисунку 5.12 наведена схема підключення котушок варметра до навантаження.

Реактивна потужність визначається за виразом

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi. \quad (8.26)$$

Для формування функції перетворення варметра $\alpha = f(Q)$ необхідно, щоб зсув між напругою U та струмом $I_{P.K}$ у колі напруги дорівнював $90^\circ - \varphi$. Для цього, як видно з рисунку 5.12, рухома котушка шунтується резистором R , а послідовно з нею вмикається котушка індуктивності L .

Функція перетворення варметра має вигляд

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{W_{nm}} \cdot \frac{dM_{H.K,P.K}}{d\alpha} \cdot I_{H.K} \cdot I_{P.K} \cdot \cos(90 - \varphi) = \\ &= S_Q \cdot I_{H.K} \cdot I_{P.K} \sin\varphi = S_Q \cdot U \cdot I \sin\varphi = S_Q \cdot Q, \end{aligned} \quad (5.27)$$

де S_Q – чутливість варметра.

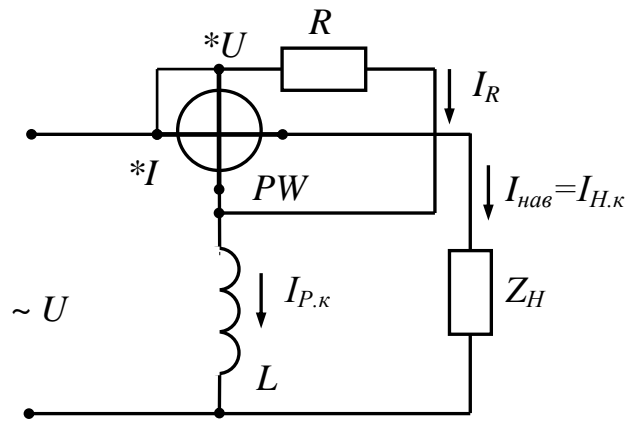


Рисунок 5.12 - Схема підключення котушок варметра до навантаження

Електродинамічні варметри застосовуються для лабораторних досліджень та для перевірки індукційних лічильників реактивної енергії.

5.2.3.4 Електродинамічний частотомір

Схема електродинамічного частотоміра на основі логометричного механізму наведена на рисунку 5.13.

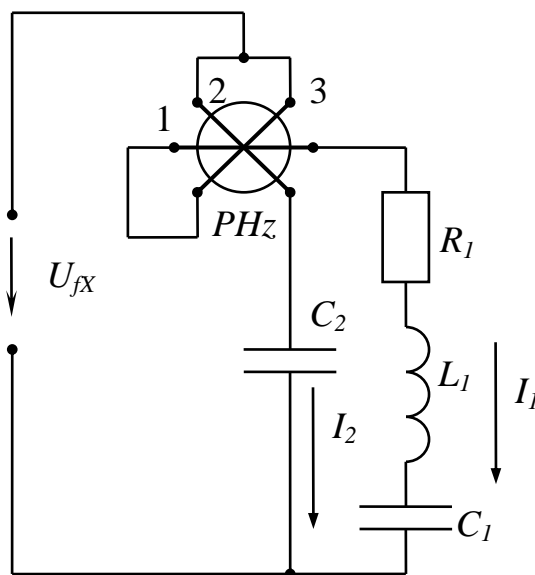


Рисунок 5.13 - Схема електродинамічного частотоміра на основі логометричного механізму

Логометричний механізм містить одну нерухому котушку 1 та дві рухомі 2 і 3, які скріплені між собою під кутом 90° . Нерухома котушка з'єднана послідовно з однією із рухомих електричним колом $R_1 - L_1 - C_1$. Параметри R_1 , L_1 та C_1 підбрані так, що частота резонансу напруги цього кола дорівнює середній частоті діапазону вимірювань. При цій частоті струм I_1 збігається за фазою з напругою U . Послідовно з рамкою 2 ввімкнена ємність C_2 , тому струм I_2 випе-

реджає напругу U практично на 90° . Таким чином, на середній частоті обертальний момент, який діє на рамку 2, дорівнює

$$M_{o62} = \kappa_2 \cdot I_2 \cdot I_1 \cos 90^\circ \cdot f_1(\alpha) = 0, \quad (5.28)$$

де κ_2 – постійний коефіцієнт.

Якщо рухома частина механізму знаходиться в такому положенні, що обертальний момент, який діє на рамку 3, дорівнює

$$M_{o63} = \kappa_3 \cdot I_1^2 \cdot f_2(\alpha) \neq 0, \quad (5.29)$$

то під дією цього моменту рухома частина буде повертатись до тих пір, поки $f_2(\alpha)$ не стане дорівнювати нулю. Стрілка приладу при цьому буде показувати середню частоту діапазону.

У момент резонансу струм I_1 збігається за фазою з напругою U_{fx} , зсув фаз між струмами I_1 та I_2 у рамках логометра дорівнює 90° , внаслідок чого вказівник приладу встановиться посередині шкали. Якщо частота напруги відхилиться від середнього значення, то вектор струму I_1 зміститься відносно вектора U на кут $+\varphi$ чи $-\varphi$. Кут між векторами струмів I_1 та I_2 буде відрізнятися від 90° , M_{o62} не буде вже дорівнювати нулю і внаслідок його дії рухома частина буде повертатися до тих пір, поки M_{o63} не стане дорівнювати M_{o62} . В цьому положенні стрілка приладу покаже значення частоти, яке відрізняється від середнього значення.

5.2.3.5 Електродинамічний фазометр

Схема електродинамічного фазометра на основі логометричного механізму наведена на рисунку 5.14. В основі приладу – електродинамічний логометр, рухомі рамки 2 та 3 якого скріплені під кутом 60° . В рамці 2 струм I_2 збігається за фазою з напругою на навантаженні U .

На рисунку 5.15 наведена векторна діаграма для пояснення фізичних процесів в електродинамічному фазометрі. В такому вимірювальному механізмі при протіканні струмів через котушки створюються два обертальні моменти, які дорівнюють

$$M_{o62} = I_2 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}; \quad (5.30)$$

$$M_{o63} = I_3 \cdot I_1 \cdot \cos(\beta - \varphi) \frac{dM_{1,3}}{d\alpha}, \quad (5.31)$$

де $M_{1,2}$, $M_{1,3}$ – взаємні індуктивності між рухомими 2 та 3 котушками та нерухомою котушкою 1.

β – кут між напругою U та струмом I_{U2} котушки 3, до кола якої увімкнена котушка індуктивності L_3 .

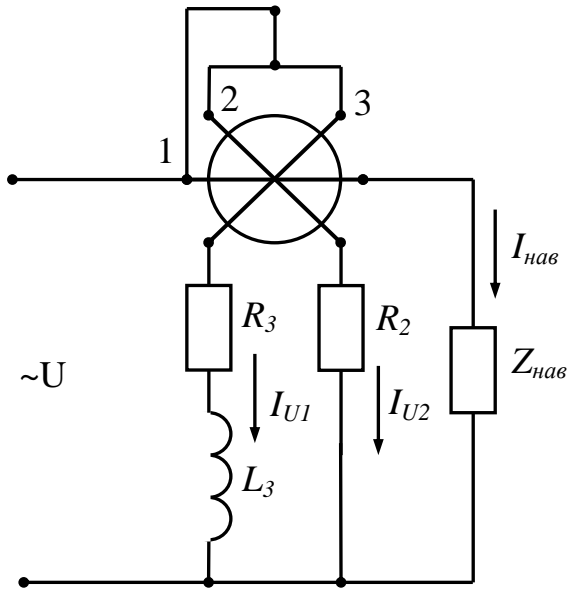


Рисунок 5.14 – Схема електродинамічного фазометра на основі логотричного механізму

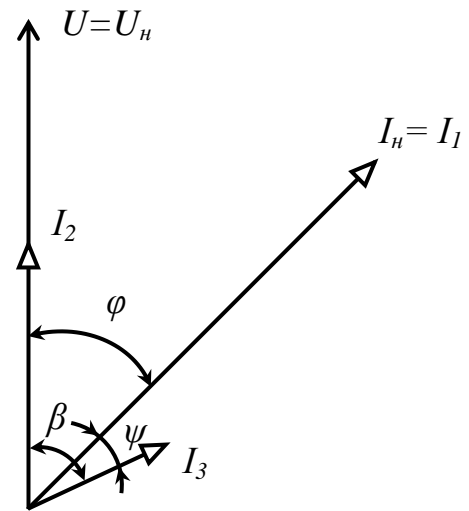


Рисунок 5.15 – Векторна діаграма фазометра

Якщо

$$\frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = f_1(\alpha); \quad (5.32)$$

$$\frac{dM_{1,3}}{d\alpha} = f_2(\alpha), \quad (5.33)$$

тоді у момент рівноваги обертальних моментів $M_{об2} = M_{об3}$ для електродинамічного логотричного фазометра справедливе співвідношення

$$\frac{f_1(\alpha)}{f_2(\alpha)} = f(\alpha) = \frac{I_3 \cos(\beta - \varphi)}{I_2 \cos \varphi}. \quad (5.34)$$

Функція перетворення фазометра має вигляд

$$\alpha = f\left(\frac{I_3 \cos(\beta - \varphi)}{I_2 \cos \varphi}\right). \quad (5.35)$$

Таким чином, в електродинамічному логотричному кут повороту рухомої частини α не залежить від струму та напруги, а є лінійною функцією відношення проєкцій векторів струмів в рухомих котушках на вектор струму в нерухомій, шкала приладу є рівномірною з нульовою позначкою посередині шкали. На основі електродинамічних механізмів базуються фазометри для вимірювань коефіцієнту потужності у трифазних симетричних колах змінного струму.

5.2.4 Електростатичні вимірювальні прилади

Принцип дії електростатичних приладів оснований на взаємодії двох систем заряджених провідників, одна з яких є рухомою.

Основні елементи конструкції електростатичного вимірювального приладу наведені на рисунку 5.16.

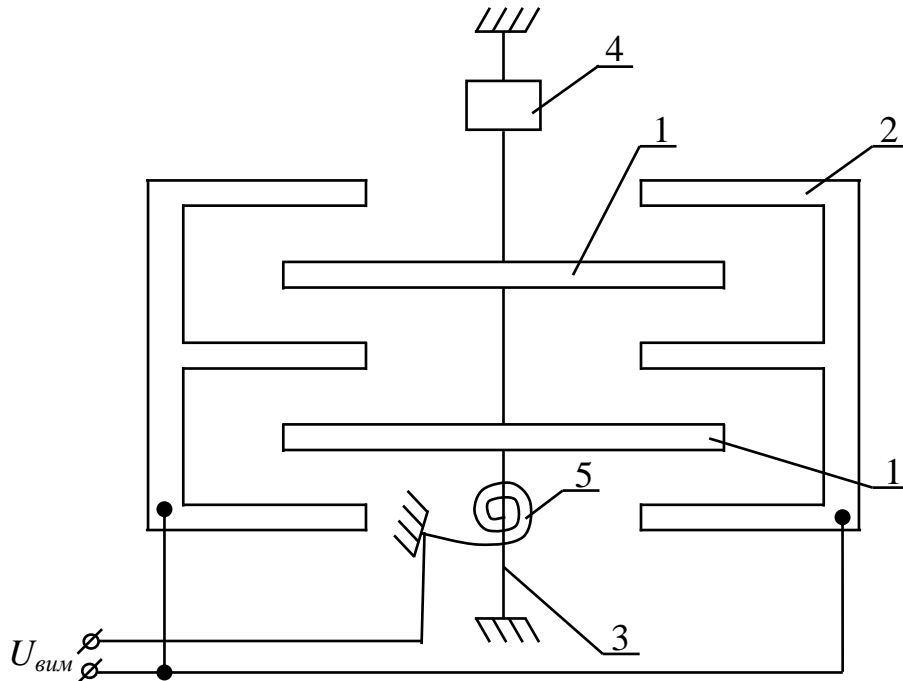


Рисунок 5.16 - Конструкція електростатичного вимірювального приладу

Якщо до нерухомих і рухомих пластин прикласти напругу постійного струму, то виникає електричне поле, пластини зарядяться протилежними за знаком зарядами, внаслідок виникають сили взаємодії між пластинами. Рухомі пластини будуть притягуватись до нерухомих. Рух припиниться тоді, коли обертальний момент $M_{об}$ зрівноважиться протидіючим моментом $M_{пр}$, який створюється спіральними пружинами.

Розглянемо аналітичні залежності, які описують теорію електростатичного приладу на постійному струмі:

- енергія електростатичного поля

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2; \quad (5.36)$$

- обертальний момент $M_{об}$

$$M_{об} = \frac{dE}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot \frac{dC}{d\alpha}; \quad (5.37)$$

- протидіючий момент

$$M_{np} = W_{nm} \cdot \alpha; \quad (5.38)$$

- функція перетворення електростатичного приладу

$$\alpha = \frac{1}{2W_{nm}} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 = S_U \cdot U^2, \quad (5.39)$$

де S_U – чутливість електростатичного приладу до напруги;

$$S_U = \frac{1}{2W_{nm}} \cdot \frac{dC}{d\alpha}, \quad (5.40)$$

де C – ємність між рухомими та нерухомими пластинами, значення якої залежить від їх взаємного переміщення;

U – значення прикладеної напруги;

W_{nm} – питомий протидіючий момент пружини.

З виразу (5.40) видно, що покази електростатичного приладу не залежать від полярності прикладеної напруги, а шкала приладу має квадратичний характер, тому то є нелінійною. Для того, щоб шкала була близька до лінійної в діапазоні від 30 до 100 % всієї довжини шкали, рухому частину виготовляють спеціальної форми, але початкова ділянка шкали від 0 до 30% відзначена спеціальною крапкою і є неробочою, тому то і не входить у діапазон вимірювання приладу. Електричне поле електростатичного вимірювального механізму невелике, тому на його роботі відбиваються зовнішні електричні поля.

Для захисту електростатичного механізму від їх впливу застосовують електричні екрани – рисунок 5.17.

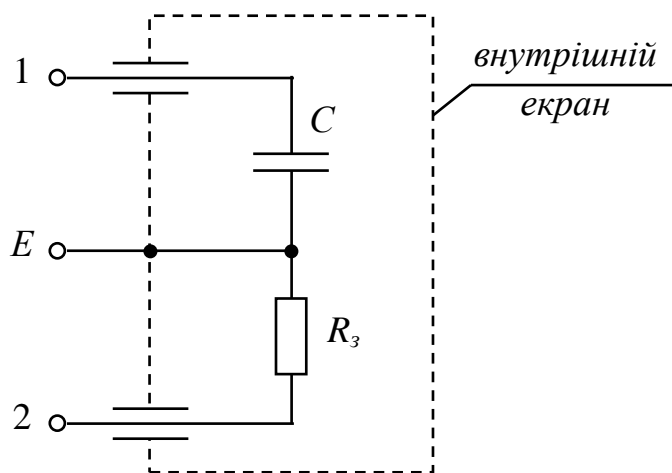


Рисунок 5.17 – Схема електростатичного вольтметра з захисним екраном

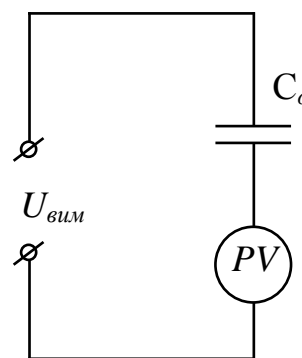


Рисунок 5.18 – Схема включення вольтметра через додатковий конденсатор

На покази електростатичних вольтметрів мало впливають температура, зовнішні магнітні поля, частота струму, форма кривої напруги, тому то такі

вольтметри можуть застосовуватись для вимірювання напруг високих частот – до 10 МГц. Споживання потужності електростатичних вольтметрів від джерела живлення доволі мале.

Для розширення меж вимірювань електростатичних вольтметрів використовують додаткові конденсатори на змінному струмі – рисунок 5.18.

Сучасні електростатичні вольтметри мають такі метрологічні характеристики: клас точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; границі вимірювань: від 10 В до 300 кВ; частотний діапазон: від 20 Гц до 35 МГц; вхідний опір: від 10^{10} до 10^{14} Ом.

Специфічна будова електростатичного вимірювального механізму надає таким приладам цілу низку переваг, а саме, можливість використання вольтметрів у колах високих напруг (до сотень кіловольт) без застосування вимірювальних трансформаторів напруги; широкий частотний діапазон; практично відсутнє власне споживання потужності; висока точність; можливість використання у колах як постійного, так і змінного струму.

Недоліками електростатичних приладів є низька чутливість, сильний вплив зовнішніх електростатичних полів та вмикання допоміжного захисного резистора R_3 (див. рисунок 5.17) для захисту вимірювального механізму від короткого замикання між пластинами при високій напрузі.

5.2.5 Індукційні вимірювальні прилади

Основою індукційних вимірювальних приладів є індукційний вимірювальний механізм, принцип дії якого оснований на взаємодії магнітних потоків нерухомих електромагнітів і вихрових струмів, які індуковані цими магнітними потоками у рухомій частині механізму, яка виконана у формі диска.

З індукційних приладів на практиці використовують тільки лічильники електричної енергії, спрощена конструкція і схема ввімкнення яких наведені на рисунку 5.19.

Лічильник електричної енергії – це інтегровальний вимірювальний прилад, який побудований на базі індукційного вимірювального механізму. Індукційний вимірювальний механізм лічильника електричної енергії містить стержневий електромагніт 1, на якому намотана обмотка кола напруги з кількістю витків w_U , П-подібний електромагніт 2, на якому намотана струмова обмотка з кількістю витків w_I , рухомий диск 3, який закріплений на осі 4, постійний магніт 5 та лічильний пристрій 6. Диск входить у зазори магнітопроводів двох електромагнітів 1 та 2.

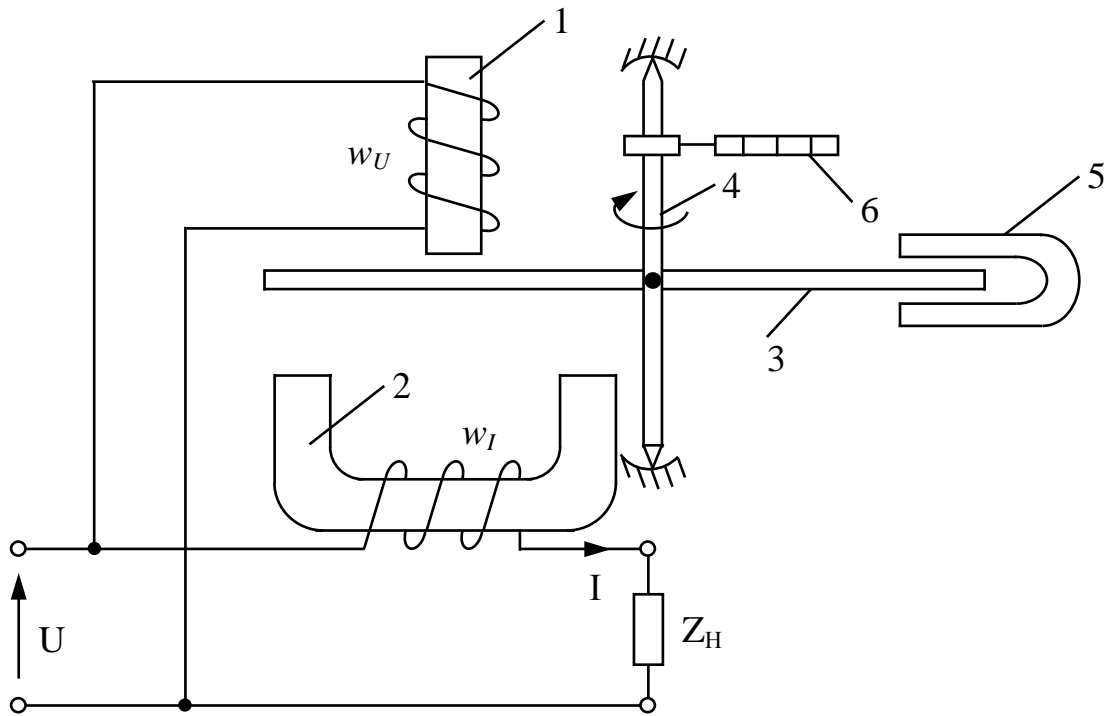


Рисунок 5.19 - Спрощена конструкція і схема ввімкнення індукційного лічильника

Обмотка електромагніту 2 – це струмове коло лічильника, яке послідовно увімкнено із споживачем, споживання електричної енергії якого вимірюють. По струмовій обмотці протікає струм споживача, значення якого може становити сотні ампер. Тому така обмотка намотана проводом великого діаметра і має невелику кількість витків та невеликий опір. Струм споживача I створює в електромагніті 2 магнітний потік, який перетинає рухомий диск у двох місцях і замикається по кінцях осердя

$$\Phi_I = k_2 \cdot I. \quad (5.41)$$

Обмотка електромагніту 1 – це коло напруги лічильника, яке паралельно увімкнене до споживача. Така обмотка має велику кількість витків і великий індуктивний опір, що призводить до відставання струму I_U в ній від напруги на кут, близький до 90° .

Струм I_U створює в електромагніті 1 магнітний потік

$$\Phi_U = k_1 \cdot I_U \cong k_1 \cdot \frac{U}{\omega \cdot L_U}, \quad (5.42)$$

де k_1 та k_2 – коефіцієнти пропорційності;

L_U - індуктивність обмотки кола напруги, Гн;

$\omega = 2\pi \cdot f$ - колова частота, c^{-1} .

Внаслідок взаємодії магнітного потоку Φ_U , створеного електромагнітом 1 і пропорційного до прикладеної напруги U , і магнітного потоку Φ_I , створеного електромагнітом 2 і пропорційного струму I , що протікає через споживач $Z_{нав}$, із вихровими струмами, які наведені цими потоками в алюмінієвому диску 3, виникає обертальний момент $M_{об}$, який приводить до обертання диску

$$M_{об} = k_{об} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cong k_{об} \cdot P, \quad (5.43)$$

де P – активна потужність споживача;

φ – кут зсуву фаз між струмом і напругою у споживачеві;

$k_{об}$ – сталий коефіцієнт.

Крім обертального моменту на рухомий диск діє гальмівний момент M_z , який виникає внаслідок взаємодії магнітного потоку Φ_m , створеного постійним магнітом 5, із вихровим струмом, який наведений цим потоком в диску, при обертанні останнього

$$M_z = k_m \cdot \Phi_m^2 \cdot \frac{d\alpha}{dt} = k_z \cdot \frac{d\alpha}{dt}, \quad (5.44)$$

де k_m та k_z – коефіцієнти пропорційності;

α – кут повороту диска.

Швидкість обертання диска стає пропорційною до потужності споживача за умови рівності обертального і гальмівного моментів $M_{об} = M_z$

$$k_{об} \cdot P = k_z \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \quad (5.45)$$

Після інтегрування виразу (5.45) на проміжку часу $\Delta t = t_2 - t_1$, отримуємо функцію перетворення індукційного вимірювального механізму

$$\alpha = \frac{k_{об}}{k_z} \cdot \int_{t_1}^{t_2} P dt = \frac{k_{об}}{k_z} \cdot W, \quad (5.46)$$

де α – кут повороту диска, на який повернувся диск за час Δt ;

$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt$ – енергія, яка спожита споживачем за час Δt .

Відповідна кількість обертів диска лічильника n дорівнює

$$n = \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{k_{об}}{k_z \cdot 2\pi} \cdot W = A_n \cdot W, \quad (5.47)$$

де C_H – номінальна стала лічильника, яка характеризує співвідношення між облікованою лічильником енергією і відповідною кількістю обертів, $кВт \cdot год / об.$;

A_n – номінальне передатне число, що дорівнює кількості обертів диска на 1 $кВт \cdot год / об.$

Номінальна стала лічильника C_H , $Bm \cdot год/об$, і номінальне передатне число зв'язані співвідношенням

$$C_H = \frac{10^3}{A_n}. \quad (5.48)$$

Енергія, W , $kBm \cdot год$, яку спожив споживач протягом певного часу визначається за виразом

$$W = 10^3 \cdot n \cdot C_H \cdot \frac{1 \cdot n}{A_n}. \quad (5.49)$$

В таблиці 5.2 наведені основні метрологічні характеристики індукційних лічильників активної електричної енергії.

Таблиця 5.2 - Основні метрологічні характеристики індукційних лічильників активної електричної енергії

| Метрологічні характеристики | Пояснення |
|-------------------------------------|---|
| Номінальний струм, $I_{НЛ}$ | Значення струму при безпосередньому вмиканні обирають із ряду: 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 80; 100 А. |
| Номінальна напруга, $U_{НЛ}$ | Значення напруги при безпосередньому вмиканні обирають із ряду: 127; 230; 240; 380; 400; 415; 480 В. |
| Номінальна частота, f_H | Значення частоти знаходиться в діапазоні 46...65 Гц, зазвичай $f_H = 50$ Гц або 60 Гц. |
| Номінальна стала, C_H | Співвідношення між облікованою енергією і відповідною кількістю обертів, $kBm \cdot год/об$. |
| Номінальне передаточне число, A_H | Кількість обертів диска на 1 $kBm \cdot год/об$. |
| Клас точності | Визначає границі допустимої основної відносної похибки. Стандарт нормує класи точності 0,5; 1,0; 2,0; 2,5. |
| Поріг чутливості | Найменше нормоване значення струму, при якому починається неперервне обертання диска за номінальних значень напруги і частоти. Для лічильників класу точності 0,5 поріг чутливості 0,3% від $I_{НЛ}$; для лічильників класу точності 1,0 – 0,4% від $I_{НЛ}$. |
| Самохід | Це обертання диска під дією поданої напруги і за відсутності струму в струмовому колі лічильника $I_L=0$. Диск лічильника не повинен здійснити більше одного повного оберту при $I_L=0$ і за будь-якої напруги U_L в діапазоні 80...100% від $U_{НЛ}$. |

5.3 Вимірювальні мости та вимірювальні компенсатори

Мостові схеми застосовуються для вимірювання параметрів електричних кіл та для вимірювання неелектричних величин сумісно з параметричними вимірювальними перетворювачами.

Мостове коло – це електричне коло, в якому можна виділити два розгалуження опорів, значення між якими дорівнює нескінченості при відповідному співвідношенні параметрів елементів кола і скінченному значенню, якщо це співвідношення не виконується. Засіб вимірювання, в основу якого покладене мостове коло, має назву **вимірювальний міст**.

Принцип дії **вимірювальних компенсаторів** полягає у компенсації (протиставленні) двох спрямованих назустріч фізичних величин, одна з яких вимірювана, а інша – зразкова.

Загальна класифікація вимірювальних мостів та вимірювальних компенсаторів наведена на рисунку 5.20.

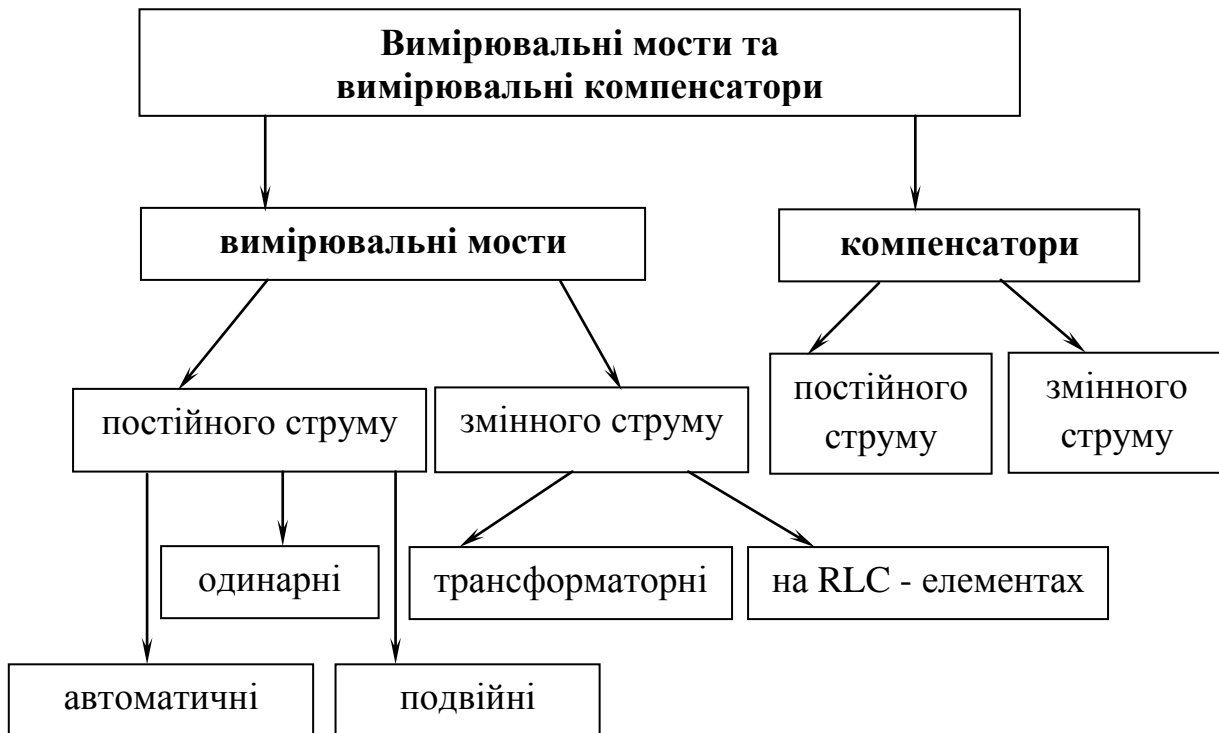


Рисунок 5.20 – Класифікація вимірювальних мостів та компенсаторів

Мости постійного струму призначені для точних вимірювань електричних опорів в широкому діапазоні частот від 10^{-8} Ом до 10^{16} Ом.

Для з'ясування принципів побудови мостових схем найчастіше використовують міст Уїтстона, схема якого подана на рисунку 5.21.

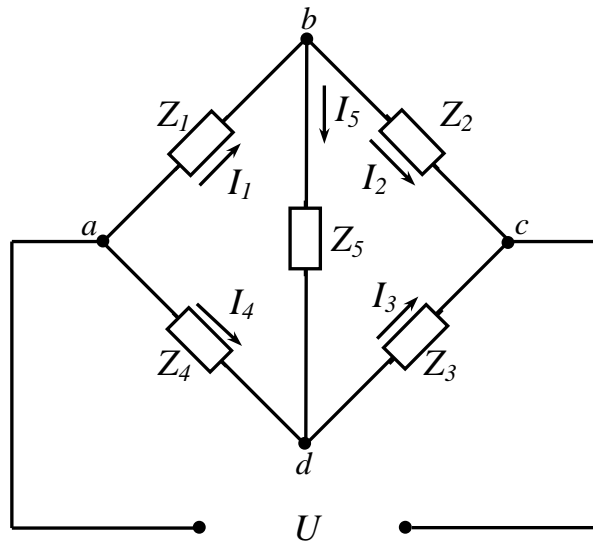


Рисунок 5.21 - Схема моста Уїтстона

Точки a, b, c, d – це **вершини моста**. Міст має чотири опори: Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 , які мають назву **плечі моста** – це електричне коло між двома суміжними вершинами моста,

Електричне коло між двома протилежними вершинами має назву **діагональ моста**: ac – це **діагональ живлення**, bd – це **вимірювальна діагональ**. В коло вимірювальної діагоналі вмикається індикатор-рівноваги ІР, внутрішній опір якого Z_5 .

Виведемо умову рівноваги для моста Уїтстона. Міст вважається зрівноваженим, коли струм I_5 у вимірювальній діагоналі відсутній ($I_5 = 0$).

Отже, у зрівноваженій схемі потенціали точок b і d однакові (точки b і d еквіпотенціальні). Однакові і спади напруг на першому Z_1 і четвертому Z_4 плечах, оскільки точка a є для них загальною

$$I_1 \cdot Z_1 = I_4 \cdot Z_4. \quad (5.50)$$

Те саме справедливе і для напруг на другому і третьому плечах моста

$$I_2 \cdot Z_2 = I_3 \cdot Z_3 \quad (5.51)$$

У зрівноваженому мостовому колі $I_5 = 0$, отже, $I_1 = I_2$; $I_3 = I_4$.

Після проміжних математичних перетворень умова рівноваги має вигляд

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4. \quad (5.52)$$

З умови рівноваги (9.3) маємо дві умови рівноваги для мостів змінного струму

$$\{ Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4; \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (5.53)$$

Рівняння системи (5.53) показують, що для зрівноваження моста змінного струму він повинен мати два регульованих елементи, які дозволяють змінювати модуль та аргумент комплексного числа. Зрівноваження моста змінного струму здійснюється по черговим регулюванням двох елементів. Число регулювань, необхідних для досягнення рівноваги моста, має назву «збіжність моста». Кількісно «збіжність моста» не оцінюється, її слід оцінювати тільки якісно: хороша (швидка) «збіжність» чи погана.

На постійному струмі опори мостової схеми є чисто активними

$$Z_1 = R_1; Z_2 = R_2; Z_3 = R_3; Z_4 = R_4.$$

Тому мостова схема на постійному струмі буде зрівноваженою, коли виконується умова рівноваги моста постійного струму

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4. \quad (5.54)$$

Порівнявши умови рівноваги (5.53) і (5.54) можна зробити висновок, що для зрівноваження мостів на змінному струмі необхідно досягти двох умов рівноваги (5.53), а на постійному – тільки одну (5.54). В цьому і є *основна особливість зрівноваження мостів постійного і змінного струму*.

Залежно від наявності напруги в вимірювальній діагоналі у моменті відліку вимірюваної величини мости поділяють на зрівноважені та незрівноважені. Незрівноважені мости застосовують для вимірювання неелектричних величин, попередньо перетворених на електричний опір.

Розглянемо вимірювальні мости постійного струму більш детально. Мости постійного струму застосовуються для вимірювання активних опорів і для вимірювання неелектричних величин сумісно з резистивними параметричними вимірювальними перетворювачами.

Практичне розповсюдження з мостів постійного струму одержали **одинарний** (чотириплечий) та **подвійний** (шестиплечий) мости.

Розглянемо **одинарний** (чотириплечий) вимірювальний міст постійного струму. Схема одинарного моста постійного струму наведена на рисунку 5.21.

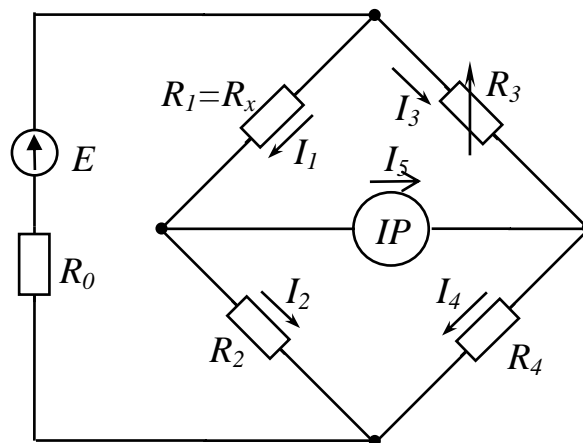


Рисунок 5.21 – Схема одинарного моста постійного струму

Міст живиться від джерела постійного струму - в діагоналі живлення знаходиться джерело живлення з е.р.с. E та внутрішнім опором R . Оскільки умова рівноваги моста (5.54) визначається лише співвідношенням опорів плечей моста і залежить від напруги джерела живлення, то до джерел живлення не висувають жодних спеціальних вимог. Завдяки цій особливості мостові вимірювальні кола широко застосовують в практиці вимірювань. У вимірювальній діагоналі ввімкнено індикатор-рівноваги (ІР). Процес вимірювання за допомогою одинарного моста полягає в тому, що в одне з плечей (наприклад, R_1) вмикають вимірюваний опір R_x .

Умова рівноваги для одинарного моста має вигляд

$$R_x \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \quad (5.55)$$

звідки

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_4}, \quad (5.56)$$

де R_2, R_4 – плечі відношення;
 R_3 – плече порівняння.

Із математичного виразу (5.56) видно, що значення опору R_x порівнюється із значенням опору R_3 в масштабі R_2/R_4 . Тому міст приводиться до рівноваги регулюванням опору R_3 , а R_2/R_4 – масштабний множник, значення якого вибирається рівним 10^n , де n – ціле додатне або від’ємне число, або $n = 0$. Плече моста R_3 має назву *плече зрівноваження (порівняння)*, а плечі R_2 та R_4 – це *плечі відношення* вимірювального моста, призначення яких – це вибір границі вимірювання моста.

Розглянемо *подвійний (шестиплечий)* вимірювальний міст постійного струму.

При вимірюванні дуже малих опорів у діапазоні від 100 до $10^{-7} \dots 10^{-8}$ Ом одинарним мостом навіть при чотирипровідному підключенні вимірюваного опору допускаються методичні похибки. В цих випадках застосовуються *подвійні* мости, нижня границя вимірювання яких 10^{-8} Ом, а верхня - 100 Ом. Схема подвійного вимірювального моста наведена на рисунку 5.22.

Вимірюваний опір R_x та зразковий R_N мають по чотири затискачі. R – опір короткого та товстого провідника, який з’єднує R_x та R_N . Він містить опори перехідних контактів. Значення цього опору дуже мале.

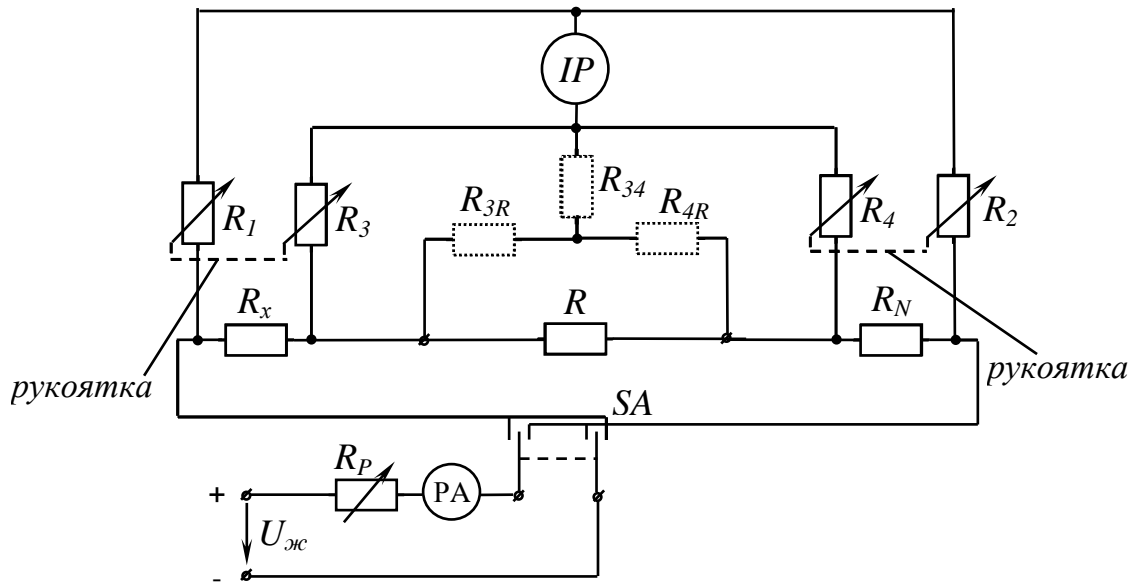


Рисунок 5.22 – Схема подвійного вимірювального моста постійного струму

Для одержання рівняння рівноваги перетворимо трикутник R_3 - R - R_4 в еквівалентну зірку за виразом

$$R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R}; \quad (5.57)$$

$$R_{3R} = \frac{R_3 \cdot R}{R_3 + R_4 + R}; \quad (5.58)$$

$$R_{4R} = \frac{R \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R}; \quad (5.58)$$

Після таких перетворень отримуємо чотириплечий міст, умова рівноваги для якого має вигляд

$$(R_x + R_{3R}) \cdot R_2 = R_1 \cdot (R_{4R} + R_N); \quad (5.59)$$

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot R_{4R} + R_1 \cdot R_N - R_2 \cdot R_{3R}. \quad (5.60)$$

Підставимо в вираз (5.60) формули (5.57)...(5.58) для опорів еквівалентної зірки

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 \cdot R}{R_3 + R_4 + R} + R_1 \cdot R_N - R_2 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 \cdot R}{R_3 + R_4 + R}. \quad (5.61)$$

звідки

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2} + \frac{R}{R_3 + R_4 + R} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot R_4}{R_2} - R_3 \right). \quad (5.62)$$

Аналіз виразу (5.62) дозволив зробити висновок, що величина R_x залежить від величини опору R , який входить до другої складової виразу. Другу

складову можна виключити, тобто зробити її рівною нулю, якщо виконати умову $\left(\frac{R_1 \cdot R_4}{R_2} - R_3\right) = 0$. Але на практиці точно виконати цю умову не можливо із-за неточності виготовлення резисторів R_1, R_2, R_3, R_4 . Тому то, для того, щоб друга складова виразу (9.14) була якомога меншою, потрібно, щоб опір R був якомога меншим. А величина вимірюваного опору R_x буде дорівнювати

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (5.63)$$

В конструкції подвійного моста є дві рукоятки регулювання, які призначені для забезпечення рівностей $R_1 = R_3$ та $R_2 = R_4$, щоб $\left(\frac{R_1 \cdot R_4}{R_2} - R_3\right) = 0$.

Цими рукоятками змінюють одночасно R_1 та R_3 , а також R_2 та R_4 . Подвійний міст призначений для вимірювання малих опорів при великому струмовому навантаженні, чим вони суттєво відрізняються від одинарних мостів. Мости постійного струму є переносними та лабораторними.

Клас точності переносних мостів від 0,1 до 5 в залежності від значень вимірюваних опорів у діапазоні від $10^{-4} \dots 10^5$ Ом. Класи точності лабораторних мостів від 0,005 до 0,01. Діапазон вимірювань одинарними мостами становить від 10^{-3} до 10^8 Ом, подвійними мостами – від 10^2 до 10^{-8} Ом, при цьому в діапазоні опорів $10^2 \dots 10^{-5}$ Ом клас точності 0,005...0,05, в діапазоні опорів $10^{-5} \dots 10^{-8}$ Ом клас точності становить 0,1...5.

Зрівноваження мостів постійного струму можна автоматизувати. На рисунку 5.23 наведена схема автоматичного моста.

Автоматичний міст містить три постійні резистори R_1, R_2, R_3 та резистор R_x , опір якого необхідно виміряти, реохорд R_p , підсилювач Π та реверсивний електродвигун $PД$.

При підключенні вимірювального моста до джерела змінної напруги промислової частоти стрілочний покажчик на шкалі знаходиться в вільному положенні.

При підключенні до вимірювального моста невідомого резистора в вимірювальній діагоналі з'являється напруга небалансу моста, яка через підсилювач надходить на живлення керуючої обмотки реверсивного електродвигуна. Ротор електродвигуна пов'язаний з повзунком реохорда та покажчиком приладу. Ротор починає обертатися та пересувати повзунок по реохорду до моменту рівноваги мостової схеми. Обертання ротору здійснюється до тих пір, доки не настане рівновага моста і напруга небалансу моста дорівнюватиме нулю. Реверсив-

ний електродвигун зупиняється. По положенню повзунка на реохорді та на шкалі приладу можна визначити величину опору резистора R_x .

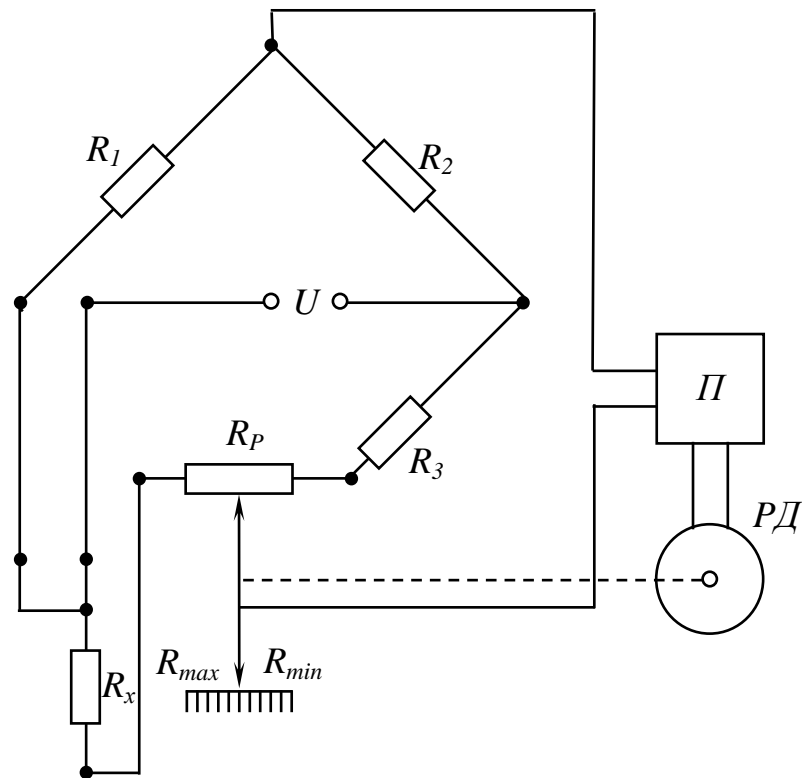


Рисунок 5.23 – Схема автоматичного вимірювального моста

Зведена похибка автоматичних мостів дорівнює 0,25 %, швидкодія становить 0,25 с. Автоматичні мости широко застосовуються для вимірювання неелектричних величин, попередньо перетворених на зміну електричного опору.

Розглянемо вимірювальні мости змінного струму. Мости змінного струму призначені для вимірювань комплексних опорів. Найпростішими та найпоширенішими є чотириплечі мости змінного струму.

Мости змінного струму застосовують для вимірювання індуктивності у діапазоні від 10^{-9} до 10^4 Гн, ємності – від 10^{10} до 10 мкФ, тангенса кута втрат – від 10^5 до 10, добротності – від 10^{-1} до 10^3 та активного опору – від 10^{-9} до 10^4 Ом, активної провідності – від 10^{-7} до 1 См в діапазоні частот від $10 \dots 5 \cdot 10^5$ Гц.

Перевагами мостів є широкий діапазон вимірювань, висока точність, можливість автоматизації вимірювання.

Схема моста з чотирма плечами змінного струму ідентична до схеми одинарного моста постійного струму – рисунок 5.24. За аналогією з мостом постійного струму складена умова рівноваги моста змінного струму, за якої напруга в вимірювальній діагоналі та струм нуль-індикатора змінного струму дорівнюють нулю

$$\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_4, \quad (5.64)$$

де $\dot{Z}_1, \dot{Z}_3, \dot{Z}_2, \dot{Z}_4$ – комплексні значення опорів плечей моста.

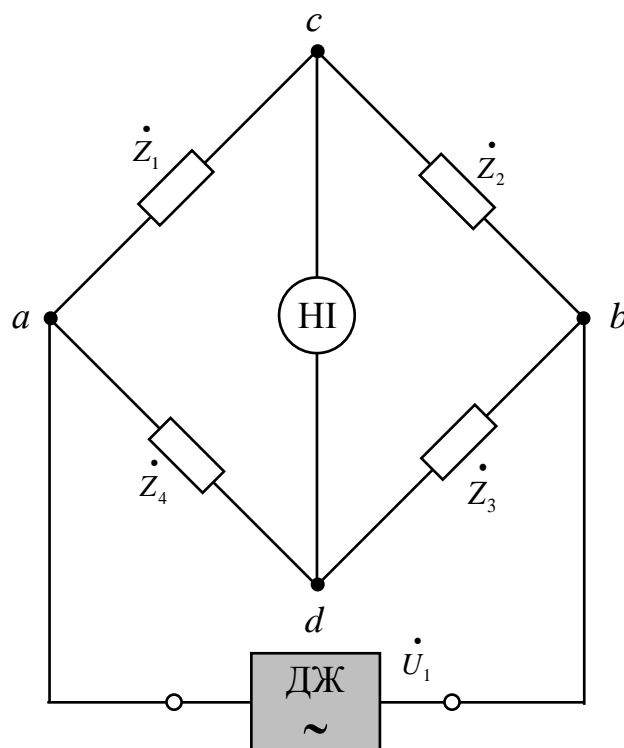


Рисунок 5.24 - Схема вимірювального моста змінного струму

Так як комплексний опір можна виразити як

$$\dot{Z} = Z e^{j\varphi}, \quad (5.65)$$

де Z – модуль комплексного опору;

φ – кут зсуву фаз між струмом і напругою на цьому опорі.

Умову рівноваги моста (5.63) представимо у вигляді

$$Z_1 \cdot Z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_2 \cdot Z_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}. \quad (5.66)$$

Умова рівноваги для моста змінного струму можлива за двох умов, які повинні виконуватись одночасно

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4; \quad (5.67)$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (5.68)$$

Висновок: для досягнення *рівноваги моста змінного струму* необхідно, щоб добутки модулів, а також суми фазових кутів опорів протилежних плечей були рівними.

Змінними параметрами плечей моста можуть бути активний опір R , ємність C або індуктивність L , однак перевагу слід надавати змінному активному опору, так як будувати магазини опору технологічно значно легше, ніж магазини ємності чи індуктивності. Мірою досконалості моста щодо швидкості зрівноважування є його *збіжність*, яка характеризує кількість почергових регулювань параметрів плечей моста, які необхідні для досягнення рівноваги.

Мости змінного струму поділяються на *частотозалежні* та на *частотно-незалежні*. Перші застосовуються для вимірювання частоти змінних сигналів, а другі – для вимірювання параметрів електричних кіл змінного струму.

Розглянемо схеми мостів для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$. На рисунку 5.25 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з малими втратами ($tg\delta_x = 10^{-5} \dots 10^{-2}$ град.). Умова рівноваги такого моста має вигляд

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega \cdot C_x} \right) \cdot R_3 = \left(R_4 + \frac{1}{j\omega \cdot C_4} \right) \cdot R_2, \quad (5.69)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad tg_x = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot R_4 \cdot C_4, \quad (5.70)$$

де R_x – активний опір конденсатора, який характеризує його активні втрати.

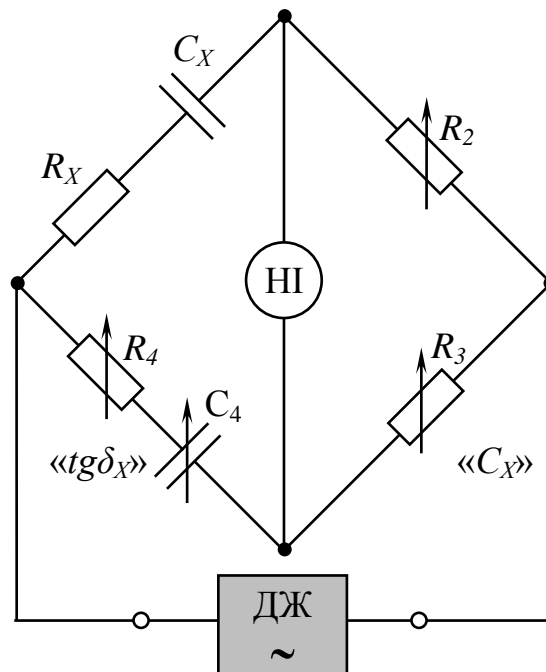


Рисунок 5.25 – Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з малими втратами

Аналіз виразу (5.69) показав, що опір плеча R_3 входить тільки у вираз для визначення ємності C_x , тому таке плече градуують в одиницях « C_x », а активний опір плеча R_4 входить тільки у вираз для визначення тангенса кута втрат « $tg\varphi_x$ », що забезпечує роздільний відлік вимірюваних величин. Зрівноваження схеми такого вимірювального моста здійснюють по чергово зміною опорів плечей R_2 та R_4 , при цьому розширення діапазону вимірювання ємності здійснюється зміною ємності плеча C_4 , а розширення діапазону вимірювання опору – зміною опору плеча R_2 , відношення яких, $C_4 / R_2 = N = 10^{\pm n}$, де n – де ціле число.

На рисунку 5.26 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з великими втратами ($tg\delta_x = 10^{-2} \dots 1$). Для схеми справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad tg_x = \frac{1}{\omega \cdot C_x \cdot R_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_4 \cdot R_4} \cdot (5.71)$$

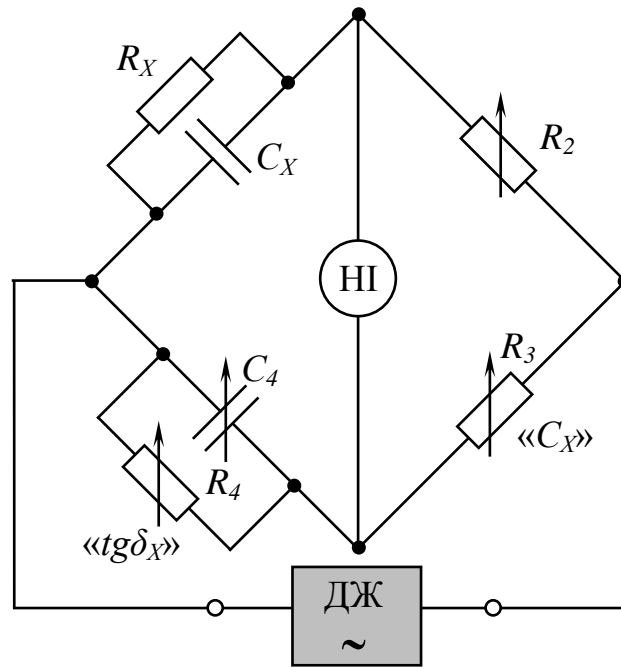


Рисунок 5.26 – Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з великими втратами

У такому разі схему моста зрівноважують по чергово зміною опорів плечей R_3 та R_4 , які відповідно проградуєвані в одиницях « C_x » і « tg_x », а розширення діапазону вимірювання – зміною відношення $C_4 / R_2 = N$.

Розглянемо схеми мостів для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя та з феромагнітним осердям. На рисунку 5.27 наведена схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного

осердя, яким властиві втрати, що зумовлені активним опором обмотки. Умова рівноваги моста має вигляд

$$(R_x + j\omega \cdot L_x) \cdot \frac{R_3}{\left(R + \frac{1}{j\omega \cdot C_3} \right)} = R_2 \cdot R_4, \quad (5.72)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad (5.73)$$

$$Q_x = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_x} = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \omega \cdot C_3 \cdot R_3. \quad (5.74)$$

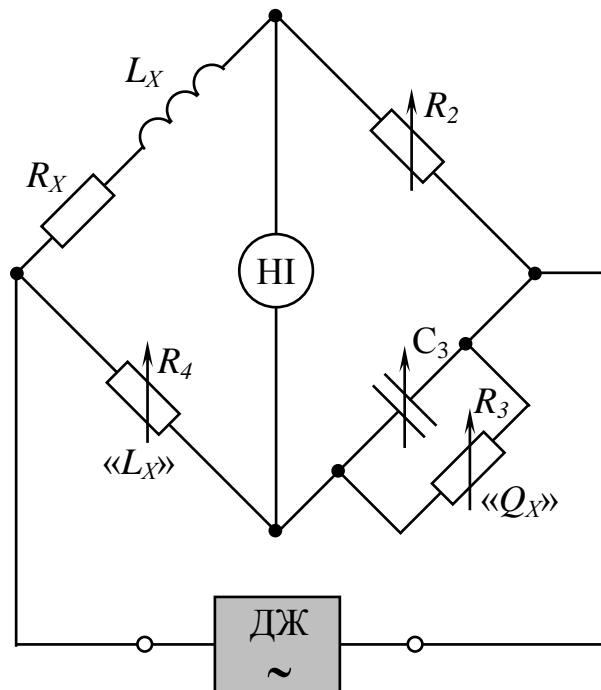


Рисунок 5.27 – Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя

Аналіз виразів (5.73) та (5.74) показав, що опір плеча R_4 входить тільки у вираз для визначення індуктивності L_x , тому таке плече градуують в одиницях « L_x », а активний опір плеча R_3 входить тільки у вираз для визначення добротності « Q_x », тому його градуують в одиницях « Q_x », що забезпечує роздільний відлік вимірюваних величин. Зрівноваження схеми такого вимірювального моста здійснюють по чергово зміною опорів плечей R_3 та R_4 , при цьому розширення діапазону вимірювання індуктивності здійснюється зміною ємності плеча C_3 , а розширення діапазону вимірювання опору – зміною опору плеча R_2 , добуток яких, $C_3 \cdot R_2 = N = 10^{\pm n}$, де n – де ціле число.

Котушкам індуктивності з *феромагнітним осердям* властиві втрати, що зумовлені вихровими струмами і перемагнічуванням осердя, тому схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x таких котушок наведена на рисунку 5.28, для якої справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad (5.75)$$

$$Q_x = \frac{R_x}{\omega \cdot L_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_3 \cdot R_3}. \quad (5.76)$$

Зрівноваження таких мостів здійснюється почергово зміною опорів плечей R_4 та R_3 , які відповідно проградуйовані в одиницях « L_x » і « Q_x », а розширення діапазону вимірювання – зміною добутку $C_3 \cdot R_2 = N$.

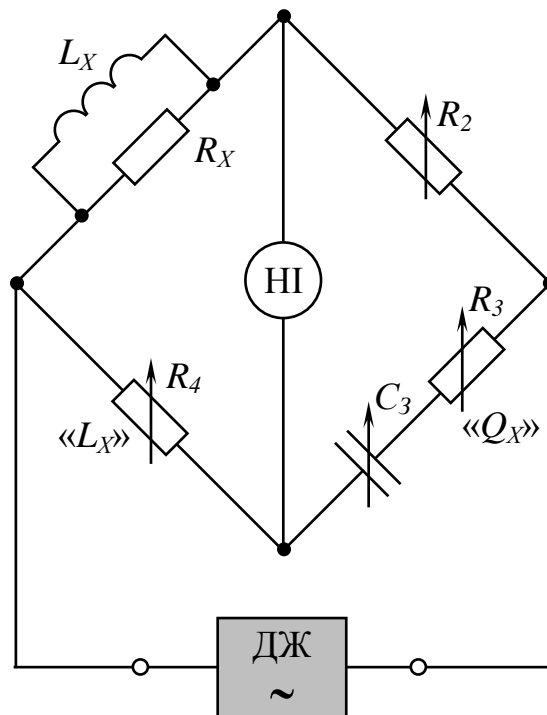


Рисунок 5.28 - Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок з феромагнітним осердям

Конструктивно мости змінного струму виготовляють з вмонтованими нуль-індикаторами, джерелами живлення, найчастіше на фіксовані частоти 50, 1000, 5000 та 10000 Гц. Промислові мости змінного струму є універсальними, так як в єдину конструкцію об'єднані декілька вимірювальних схем. Такі вимірювальні мости призначені для вимірювань комплексних опорів, ємності, індуктивності, тангенса кута втрат і тангенса кута зсуву фаз між векторами напруги та струму.

Діапазони вимірювань дорівнюють: ємності від 10^{-9} до 10^2 мкФ, індуктивності від 10^{-7} до 10^2 Гн, опору від 10^{-2} до 10^6 Ом, тангенса кута втрат і тангенса

кута зсуву фаз від 10^{-4} до 1. Робочі частоти при цьому дорівнюють 1; 5; 10 і 50 $\kappa\Gamma\text{ц}$, а основна похибка вимірювання на частоті 1 $\kappa\Gamma\text{ц}$ складає при вимірюваннях: ємності 0,02%, індуктивності 0,05%, опору 0,1%, тангенса кута втрат 1,0%.

Для точних вимірювань параметрів кіл змінного струму, а також неелектричних величин і магнітних характеристик матеріалів застосовують *трансформаторні мости*. Основними компонентами трансформаторних мостів є індуктивні елементи з тісним зв'язком.

На рисунку 5.29.а наведена автотрансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста. На рис. 5.29.б наведена трансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста.

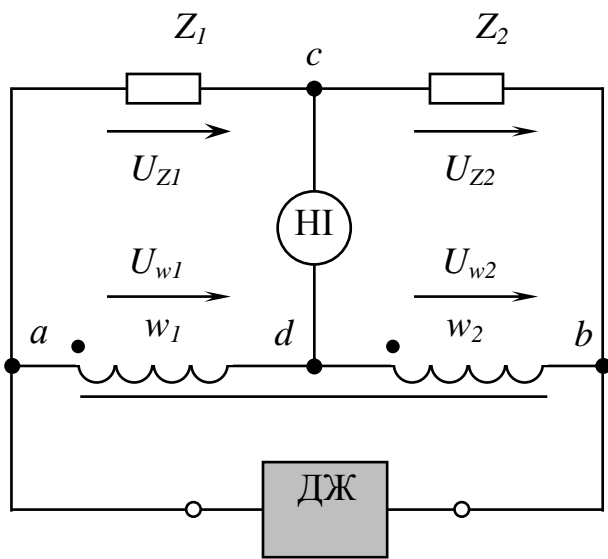


Рисунок 5.29.а - Автотрансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста

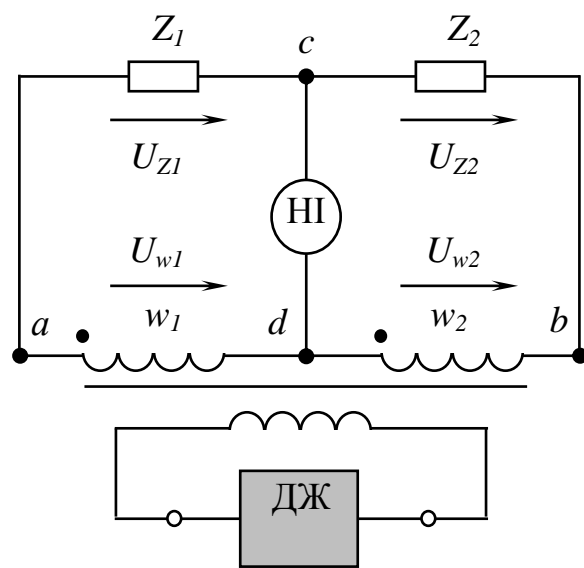


Рисунок 5.29.б - Трансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста

Рівновага схем мостів, зображених на рисунку 5.29, настає за умови, коли напруги U_{w1} і U_{w2} на плечових елементах з кількістю витків відповідних обмоток w_1 та w_2 дорівнюють за модулем і збігаються за фазою відповідно з напругами U_{Z1} і U_{Z2} на комплексних опорах Z_1 і Z_2

$$U_{w1} = U_{Z1}; U_{w2} = U_{Z2}. \quad (5.77)$$

Так як для елементів з тісним індуктивним зв'язком справедливе співвідношення

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (5.78)$$

тоді

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (5.79)$$

При підключенні у плече Z_1 вимірюваного комплексного опору Z_x , а у плече Z_2 – зразкового комплексного опору Z_N , тоді

$$Z_x = Z_N \cdot \frac{w_1}{w_2}. \quad (5.80)$$

Рівностями (5.79) та (5.80) пояснюється висока точність трансформаторних мостів, оскільки відношення витків $\frac{w_1}{w_2}$ може бути відоме, з похибкою в ідеальному випадку близькою до 0. В реальності для забезпечення співвідношення (5.78) необхідно виконати ряд додаткових умов, а саме, рівності активних опорів R_{w1} і R_{w2} відповідних обмоток і зведення до мінімуму магнітних потоків розсіювання та паразитних міжвиткових ємностей (це досягається спеціальною технологією виготовлення елементів з тісним індуктивним зв'язком).

Основними *перевагами* всіх трансформаторних мостів є висока точність, широкий частотний діапазон (до сотень мегагерц), захищеність від впливу зовнішніх електромагнітних завад і внутрішніх електричних та магнітних зв'язків і, що особливо важливо, висока збіжність.

Розглянемо компенсаційні засоби вимірювань. Принцип дії компенсаційного засобу вимірювань (компенсатора) полягає в компенсації (протиставленні) двох спрямованих назустріч фізичних величин, одна з яких вимірювана, а інша – зразкова (відома з високою точністю).

Принцип дії компенсатора напруги постійного струму – рисунок 5.30, полягає у тому, що вимірювана ЕРС, E_x , врівноважується відповідним спадом напруги $U_\kappa = I_p \cdot R_{\kappa x}$ на компенсаційному резисторі R_κ у разі проходження через нього струму I_p від зовнішнього джерела напруги GB . У момент рівноваги, яка досягається регулюванням компенсаційної напруги, показ нуль-індикатора, увімкненого в досліджуване коло (перемикач SA встановлюється в положення «Х»), дорівнюватиме нулю. Тоді

$$E_x = U_\kappa = I_p \cdot R_{\kappa x}, \quad (5.81)$$

де $R_{\kappa x}$ – частина компенсаційного опору, з якому знімають компенсаційну напругу.

Значення компенсаційної напруги можна визначити за положенням декадного перемикача компенсаційного опору, тобто за значенням $R_{\kappa x}$ лише за умови, що через R_κ протікає робочий струм I_p точно відомого значення.

Щоб встановити робочий струм, перемикач SA встановлюється в положення «HE» і за допомогою регулювального резистора R досягають рівності напруги на опорі R_y та ЕРС нормального елемента (HE), E_N , про що свідчить нульовий показ нуль-індикатора.

Тоді

$$I_p = \frac{E_N}{R_y}, \quad (5.82)$$

при цьому

$$E_x = U_K = \frac{E_N}{R_y} \cdot R_{KX} = E_N \cdot \frac{R_{KX}}{R_y}. \quad (5.83)$$

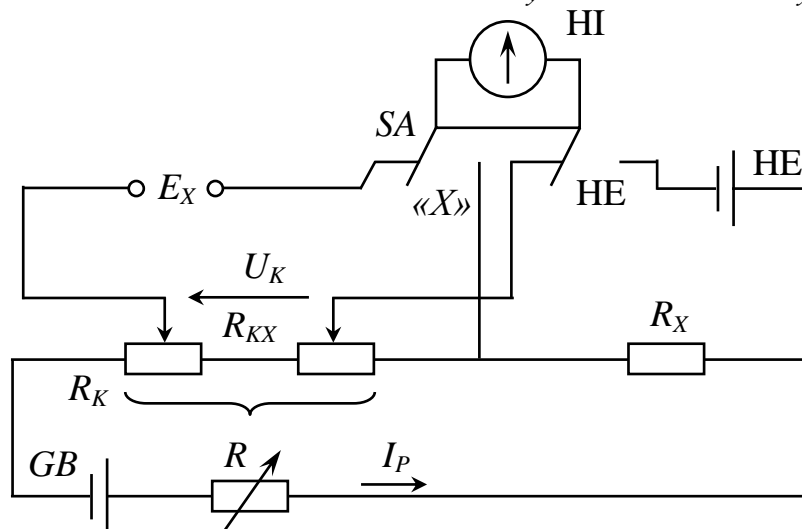


Рисунок 5.30 – Компенсатор постійного струму

Отже, вимірювання E_x зводиться до порівняння його значення зі значенням ЕРС нормального елемента в масштабі відношення $\frac{R_{KX}}{R_y}$, а похибка вимірювання E_x визначається сумою похибок ЕРС нормального елемента та похибкою відношення $\frac{R_{KX}}{R_y}$. При точних значеннях E_N та R_y і високій чутливості нуль-індикатора значення робочого струму встановлюється з високою точністю.

Компенсатори постійного струму поділяються на *дві групи: компенсатори великого опору і компенсатори малого опору*. У перших опір робочих кіл (компенсаційних декад) досягає 10000 Ом на 1 В, їх робочий струм здебільшого дорівнює 10^{-4} А. Верхня межа вимірювання таких компенсаторів 1,2...2,5 В. Компенсатори малого опору, якщо верхня межа вимірювання становить десятки мілівольт, мають робочий струм 1...25 мА. Слід відзначити дуже важливу властивість компенсаторів, яка полягає у тому, що в момент компенсації струм

у вимірювальному колі практично відсутній, від досліджуваного об'єкту практично не споживається енергія.

Принцип роботи компенсаторів змінного струму, як й постійного, полягає у зрівноваженні вимірюваної напруги U_x відомою напругою U_k . Рівноваги двох змінних величин можна досягти тільки тоді, коли їх частоти й амплітудні значення однакові, а фази протилежні. Для того щоб частоти вимірюваної та компенсаційної напруги були однакові необхідно забезпечити живлення досліджуваного об'єкту та вимірювального кола компенсатора від спільного джерела напруги, при цьому їх слід розділити гальванічно. Так як форми напруг U_x і U_k , які утворені у різних електричних колах, можуть відрізнитись від синусоїди, тому то для фіксації моменту рівноваги використовують частотновибіркові індикатори змінного струму, налаштовані на основну гармоніку. Відповідно до двох форм запису векторних величин у полярних та прямокутних координатах існує два способи зрівноваження вимірюваної напруги і два різновиди компенсаторів змінного струму – компенсатори полярно-координатні та компенсатори прямокутно-координатні.

Найпоширенішими є прямокутно-координатні компенсатори – рисунок 5.31.

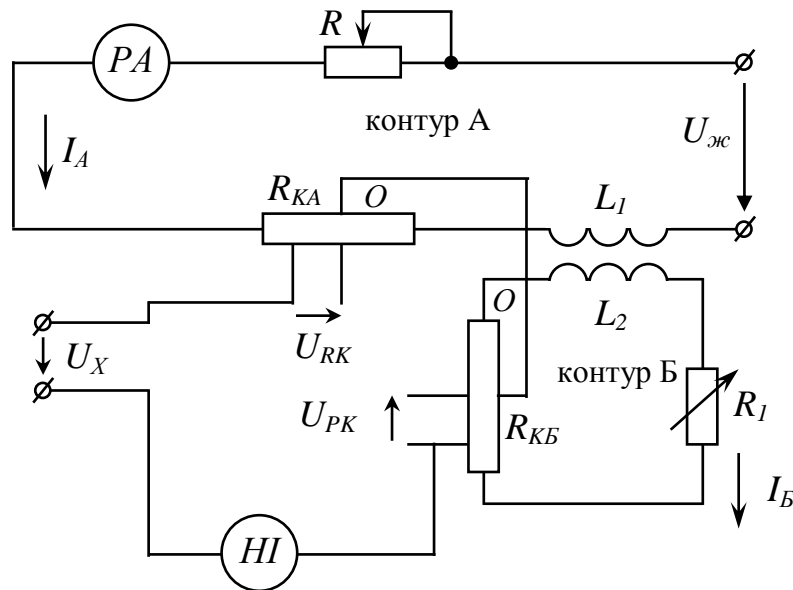


Рисунок 5.31 – Схема прямокутно-координатного компенсатора

Напруга $U_{кx}$ створюється робочим струмом I_{px} , який протікає через компенсаційний опір (реохорд) $R_{кx}$ і збігається з робочим струмом за фазою. Для отримання напруги $U_{кy}$ використовується котушка взаємної індуктивності M , у вторинному колі якої є компенсаційний опір (реохорд) $R_{кy}$. У момент рівноваги, настання якої визначається за нульовим показанням нуль-індикатора, спостерігається рівність

$$|U_x| = U_{кx}; \quad |U_{xy}| = U_{кy}. \quad (5.84)$$

Встановлюють робочий струм за допомогою резистора R за показаннями амперметра PA . Основне призначення компенсаторів змінного струму – це дослідження малопотужних кіл змінного струму та безпосереднього вимірювання ЕРС та напруги, а також для опосередкованого вимірювання струму, магнітного потоку, індукції, напруженості магнітного поля, повного, активного та реактивного опорів. Компенсатори постійного та змінного струму можуть бути забезпечені пристроями для автоматичної компенсації вимірюваної напруги. Так само, як і в автоматичних мостах, напруга небалансу після підсилення підсилювачем подається на електродвигун, увімкнений у коло зворотного зв'язку. За допомогою електродвигунів (одного у компенсаторі постійного струму та двох в компенсаторі змінного струму) пересуваються повзунки реохордів до настання моменту компенсації.

Контрольні запитання при вивченні теми 5

- 1 Дайте поняття електромеханічного вимірювального приладу. Які дві основні частини входять до його складу?
- 2 Сформулюйте сутність фізичного ефекту, який покладено в основу роботи магнітоелектричних вимірювальних приладів.
- 3 Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії магнітоелектричного вимірювального приладу.
- 4 Обґрунтуйте, що галузь застосування магнітоелектричного вимірювального приладу – це вимірювання постійних струмів.
- 5 Сформулюйте сутність фізичного ефекту, який покладено в основу роботи електромагнітних вимірювальних приладів.
- 6 Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії електромагнітного вимірювального приладу.
- 7 Обґрунтуйте, що галузь застосування електромагнітного вимірювального приладу – це вимірювання постійних та змінних струмів.
- 8 Сформулюйте сутність фізичного ефекту, який покладено в основу роботи електродинамічних вимірювальних приладів.
- 9 Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії електродинамічного вимірювального приладу.
- 10 Обґрунтуйте, що галузь застосування електродинамічного вимірювального приладу – це вимірювання постійних та змінних струмів.
- 11 Сформулюйте сутність фізичного ефекту, який покладено в основу роботи електростатичних вимірювальних приладів.

- 12 Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії електростатичного вимірювального приладу.
- 13 Обґрунтуйте, що галузь застосування електростатичного вимірювального приладу – це вимірювання постійних та змінних напруг.
- 14 Наведіть основні поняття та означення для мостових засобів вимірювання.
- 15 За якими ознаками класифікують мостові засоби вимірювань?
- 16 Складіть методику вимірювання активних опорів.
- 17 Подвійний міст. Схема, умова рівноваги, галузь застосування.
- 18 Автоматичний міст постійного струму: структурна схема, принцип дії, галузь застосування.
- 19 Наведіть принципову схему компенсатора постійного струму, поясніть принцип дії та наведіть основні метрологічні характеристики.

Список літератури

1. Нестерчук Д.М. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 256 с.
2. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. - 172 с.
3. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
4. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
5. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 656 с.
6. Нестерчук Д.М. Практикум з дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології»: навчальне видання / Д.М.Нестерчук, М.В.Постнікова. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. - 100 с.
7. Панев Б.И. Электрические измерения. Справочник / Б.И.Панев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.

ТЕМА 6. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

План лекції

- 6.1 Загальні відомості. Класифікація цифрових вимірювальних приладів
- 6.2 Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП)
- 6.3 Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП)
- 6.4 Цифрові прилади для вимірювання електричних величин
- 6.5 Мікропроцесорні цифрові вимірювальні прилади

6.1 Загальні відомості. Класифікація цифрових вимірювальних приладів

Цифрові засоби вимірювальної техніки виникли через потреби практики в підвищенні точності, швидкодії і чутливості ЗВТ. Цифрові засоби охоплюють всі вимірювані в промисловості та наукових дослідженнях фізичні величини. В цифрових приладах з метою уніфікації елементної бази та забезпечення зручності в користуванні фізичним носієм вимірювальної інформації застосовані електричні сигнали, а саме, напруга постійного струму. Такі сигнали мають незаперечні переваги над рештою сигналів, а саме: універсальність, дистанційність, наявність добре розроблених методів та засобів опрацювання, можливість реєстрації швидкоплинних процесів, простота узгодження із засобами цифрової обчислювальної техніки. З погляду функціонального призначення цифрові засоби вимірювальної техніки поділяють на *аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), цифрові вимірювальні прилади та цифрові вимірювальні системи.*

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) – це вимірювальний перетворювач, який призначений для автоматичного перетворення неперервної вимірюваної величини аналогового сигналу в пропорційну їй дискретну величину, яка зображена цифровим кодом.

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) – це вимірювальний перетворювач, який призначений для перетворення цифрового коду в аналогову величину.

Цифровими вимірювальними приладами (ЦВП) є такі прилади, в яких під час вимірювання здійснюється автоматичне перетворення неперервної вимірюваної величини в дискретну з подальшою індикацією результату вимірювання у цифровій формі.

Цифровими вимірювальними системами (ЦВС) є 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.

На рисунку 6.1 наведена узагальнена структурна схема ЦВП.

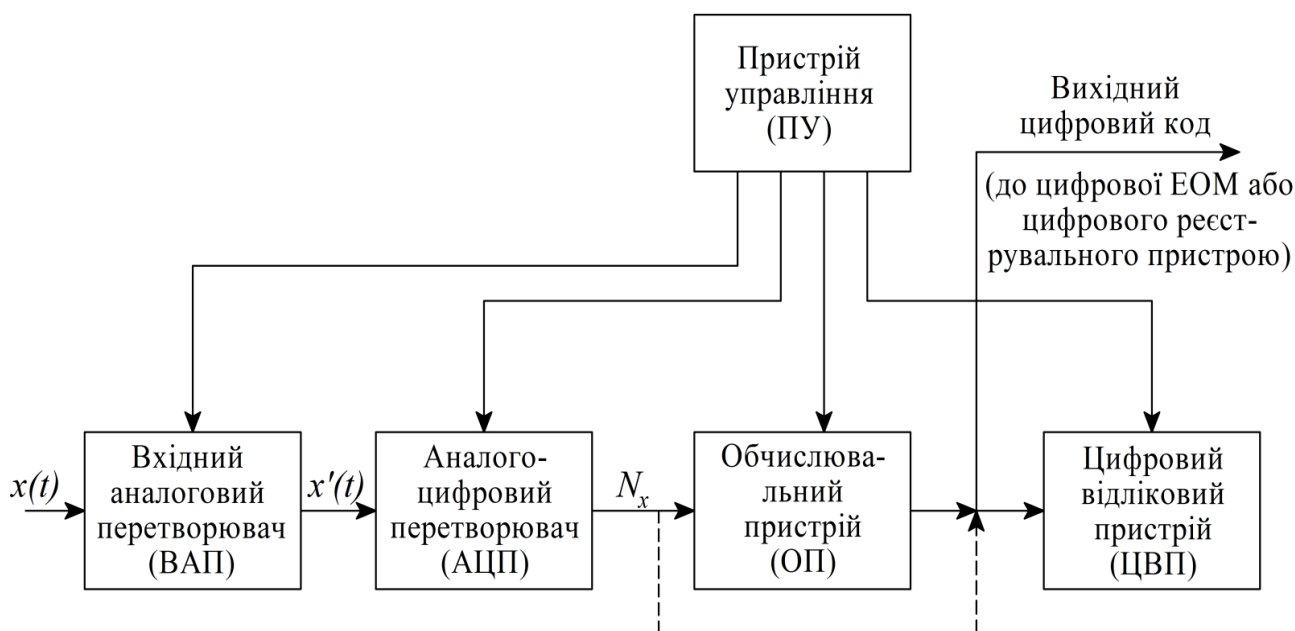


Рисунок 6.1 – Узагальнена структурна схема ЦВП

Основними функціональними вузлами ЦВП є: вхідний аналоговий перетворювач (ВАП), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), обчислювальний пристрій (ОП), цифровий відліковий пристрій (ЦВП) і пристрій управління (ПУ).

Вимірювана величина $x(t)$ спочатку перетворюється за допомогою ВАП в іншу величину $x'(t)$, зручну для подальшого аналого-цифрового перетворення. Наприклад, ВАП перетворює напругу або силу змінного струму в напругу постійного струму, електричний опір в напругу постійного струму, виконує масштабне перетворення вхідного сигналу тощо. Аналого-цифровий перетворювач перетворює величину $x'(t)$, у відповідний їй цифровий код N_x , який або надходить безпосередньо на цифровий відліковий пристрій ЦВП, або піддається додатковому опрацюванню в обчислювальному пристрої (ОП). Зокрема, ОП може усереднювати результати декількох вимірювань для зменшення випадкової похибки, визначення параметрів сигналів, наприклад, частоти на основі інформації про період та інші сервісні функції. Цифровий відліковий пристрій містить дешифратор для перетворення вихідного цифрового коду АЦП або ОП в десятковий цифровий код і табло індикації результату вимірювання. Вихідний цифровий код АЦП або ОП може надійти також на цифровий реєструвальний пристрій або на вхід ЕОМ і використовуватись у системах керування об'єктами. Роботою всіх вузлів ЦВП керує пристрій управління ПУ.

Границя допустимої відносної похибки ЦВП визначається за формулою

$$\delta_{zp} = \left[c + d \left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right] \cdot 100\% , \quad (6.1)$$

де c/d – коефіцієнти, якими визначається клас точності ЦВП;

x_k, x – границя вимірювання та показ ЦВП відповідно.

Важливою характеристикою ЦВП є їх *швидкодія* – це кількість вимірювань (для АЦП – перетворень) за одну секунду або час одного вимірювання (перетворення). Швидкодія ЦВП визначається здатністю оператора відраховувати покази, що змінюються. Враховуючи інерційність людського зору, недоцільно створювати ЦВП із швидкодією більш, ніж 10-12 вимірювань за секунду.

Основними перевагами ЦВП є:

- висока швидкодія (до сотень мільйонів вимірювань в секунду), через що об'єктивно необхідно використовувати засоби обчислювальної техніки для опрацювання результатів вимірювань;
- висока точність, яка може наближатись до точності робочих еталонів одиниць фізичних величин;
- відсутність суб'єктивних складових похибки відліку, наявність яких лімітує максимально можливу точність аналогових приладів;
- наявність сигналу є зручним для його опрацювання, запам'ятовування, реєстрації і передавання на великі відстані без похибок та з коригуванням збоїв;
- можливість зменшення складових похибки вимірювального кола;
- можливість забезпечення високої завадостійкості перетворення аналог-код за допомогою цифрової фільтрації результатів перетворень;
- можливість визначення статистичних параметрів вимірюваних процесів на основі програмної реалізації відомих теоретичних математичних залежностей.

Недоліками ЦВП є складність, порівняно висока вартість і менша, ніж в аналогових приладах, надійність, а також певні незручності для оператора у порівнянні заданого показу з границями вимірювання. Слід відзначити, що аналогову інформацію оператор оцінює миттєво, а цифрову – необхідно запам'ятовувати та зіставляти з границями вимірювання.

6.2 Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП)

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) – це вимірювальний перетворювач, який призначений для автоматичного перетворення неперервної вимірюваної величини аналогового сигналу в пропорційну її дискретну величину, зображену цифровим кодом. Під час такого перетворення здійснюється дискре-

тизація та квантування вхідного сигналу й цифрове кодування вимірювальної інформації.

Дискретизація сигналу – це заміна неперервної у часі величини її окремими вибірками, взятими в певні моменти часу.

Суть квантування полягає у заміні неперервних значень сигналу в області його інтенсивності (рівня) квантованими (дозволеними) значеннями. Квантований номер, що відповідає вибірці вхідної величини у певний момент часу, зображується певним кодом і подається цифровим сигналом, який подається лише двома різними рівнями. Загалом АЦП не мають відлікових і (або) реєструвальних пристроїв і є базовою частиною складніших цифрових приладів або вимірювально-обчислювальних систем.

Як зазначено вище, під час аналого-цифрового перетворення виконується операція дискретизації вимірюваної величини в часі, при цьому в дискретизованому сигналі немає проміжних значень вхідного сигналу між мітками часу t_i та t_{i+1} , тому то може втрачатися вимірювальна інформація про проміжні значення сигналу, як наслідок, виникає похибка від дискретизації. Під час дискретизації розглядаються дві часові характеристики такого процесу:

- перша характеристика – це такий часовий інтервал між почерговими вимірюваннями сигналу, за сталим часом його називають *періодом дискретизації сигналу* $T_0 = t_{i+1} - t_i$;

- друга характеристика – це інтервал часу $T_{АЦ}$ аналого-цифрового перетворення сигналу, а саме, час, який необхідно витратити, щоб отримати один цифровий результат вимірювання сигналу.

Кодування результату аналого-цифрового перетворення – це операція його подання за допомогою сукупності (кодових) символів вибраного алфавіту (системи числення), що здійснюється за однозначними правилами. Використовується числове кодування і для цифрових вимірювань це є операція переведення числового значення заданої величини N_x в іншу систему числення, а результати подаються бінарними символами, тобто лише двома різними рівнями.

Безпосереднє кодування результатів аналого-цифрового перетворення, крім застосування у вимірювальній техніці, кодування використовується також у пристроях відображення результатів, а також з метою отримання певного рівня завадостійкості під час передавання результатів каналами зв'язку. Кожен закодований результат зображають певною кількістю кодових символів або кодовою комбінацією, яка відповідає правилам вибраного коду.

Цифровий код – це сукупність правил, які встановлюють значення кожного елемента залежно від його місця у кодовій комбінації та її довжини. У вимірювальній техніці найчастіше використовують такі цифрові коди, які наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Цифрові символи первинних цифрових кодів загального використання

| Десяткове число | 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 |

Розглянемо кожний цифровий код більш детально:

- *одиничний нормальний (число-імпульсний) код* – значення числа подається кількістю імпульсів;

- *одиничний позиційний код* – значення числа відображається 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 до 10 у відповідному степені, наприклад $654=6 \cdot 10^2+5 \cdot 10^1+4 \cdot 10^0$;

- *двійковий нормальний код* (основою є число 2) – значення числа записують у двійковій системі числення послідовністю n 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. Вага цифри у числі дорівнює числу 2 у степені, яка визначається номером розряду

$$N_x = a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_2 2^2 + a_1 2^1 + a_0 2^0 = \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i \quad (6.2)$$

Приклад 6.1 Записати десяткове значення восьми розрядного двійкового числа 10011101 в двійковому нормальному кодi.

$$N_x = a_7 2^7 + a_6 2^6 + a_5 2^5 + a_4 2^4 + a_3 2^3 + a_2 2^2 + a_1 2^1 + a_0 2^0 = 1 \times 128 + 0 \times 64 + 0 \times 32 + 1 \times 16 + 1 \times 8 + 1 \times 4 + 0 \times 2 + 1 \times 1 = 157;$$

- *двійково-десятковий код* – кожна цифра (розряд) десяткового числа подається двійковим кодом, при цьому використовують чотири двійкові розряди – *тетраду*, а кількість тетрад дорівнює кількості десяткових розрядів числа.

На рисунку 6.2 наведена класифікація аналого-цифрових перетворень, аналіз якою показує, що методи аналого-цифрового перетворення можна класифікувати за різними ознаками: за видом вхідної перетворюваної величини, за способом порівняння з одиницею величини, за структурною схемою.

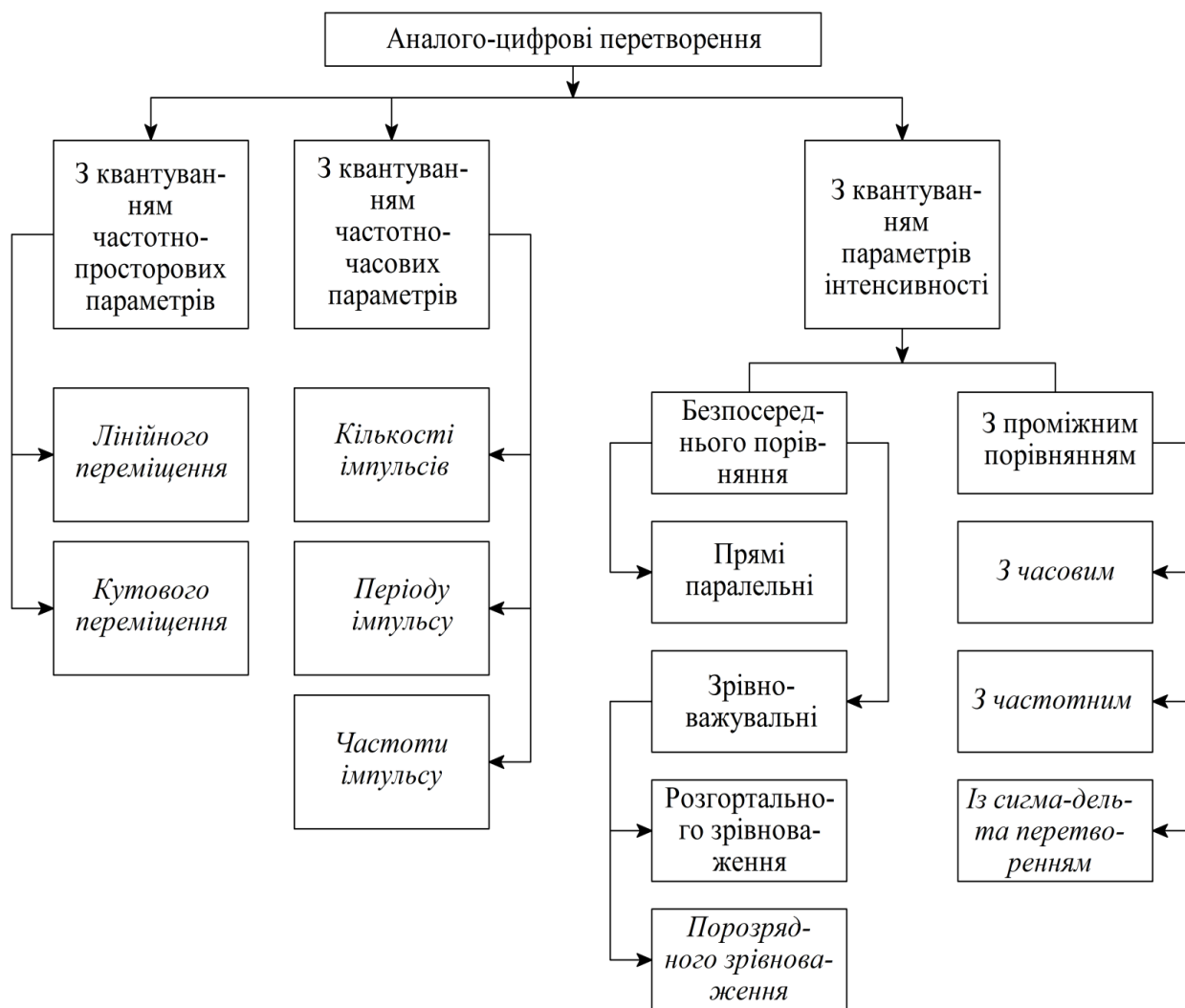


Рисунок 6.2 - Класифікація аналого-цифрових перетворень

В залежності від роду перетворюваних величин та методу квантування існують три основні способи аналого-цифрового перетворення: з квантуванням просторових параметрів, частотно-часових параметрів та параметрів інтенсивності вимірювальних сигналів.

6.3 Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП)

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) - це вимірювальний перетворювач, який призначений для перетворення цифрового коду в аналогову величину. Принцип перетворення міститься в підсумовуванні усіх розрядних струмів (напруг), які зважені за двійковим законом та пропорційних значенню опорної напруги. При цьому підсумовуються тільки струми тих розрядів, значення яких дорівнюють логічній 1. У двійковому коді вага від розряду до розряду змінюється удвічі. ЦАП класифікуються за:

- видом вихідного сигналу: з струмовим виходом та виходом у вигляді напруги;
- за типом цифрового інтерфейсу: з послідовним вводом та паралельним вводом вхідного коду;
- за кількістю ЦАП на кристалі: одноканальні та багатоканальні;
- за швидкодією.

Стандартним засобом для перетворення цифрового коду в аналогову величину є сітка із прецизійних резисторів, яка підключена до джерела опорної напруги. Перемикання резисторів здійснюється електронними ключами, керованими цифровим кодом N_x . Для прикладу розглянемо ЦАП з ланцюговою сіткою R-2R резисторів, який призначений для перетворення m-розрядного цифрового коду N_x у напругу $N_{вих}$ – рисунок 6.3.

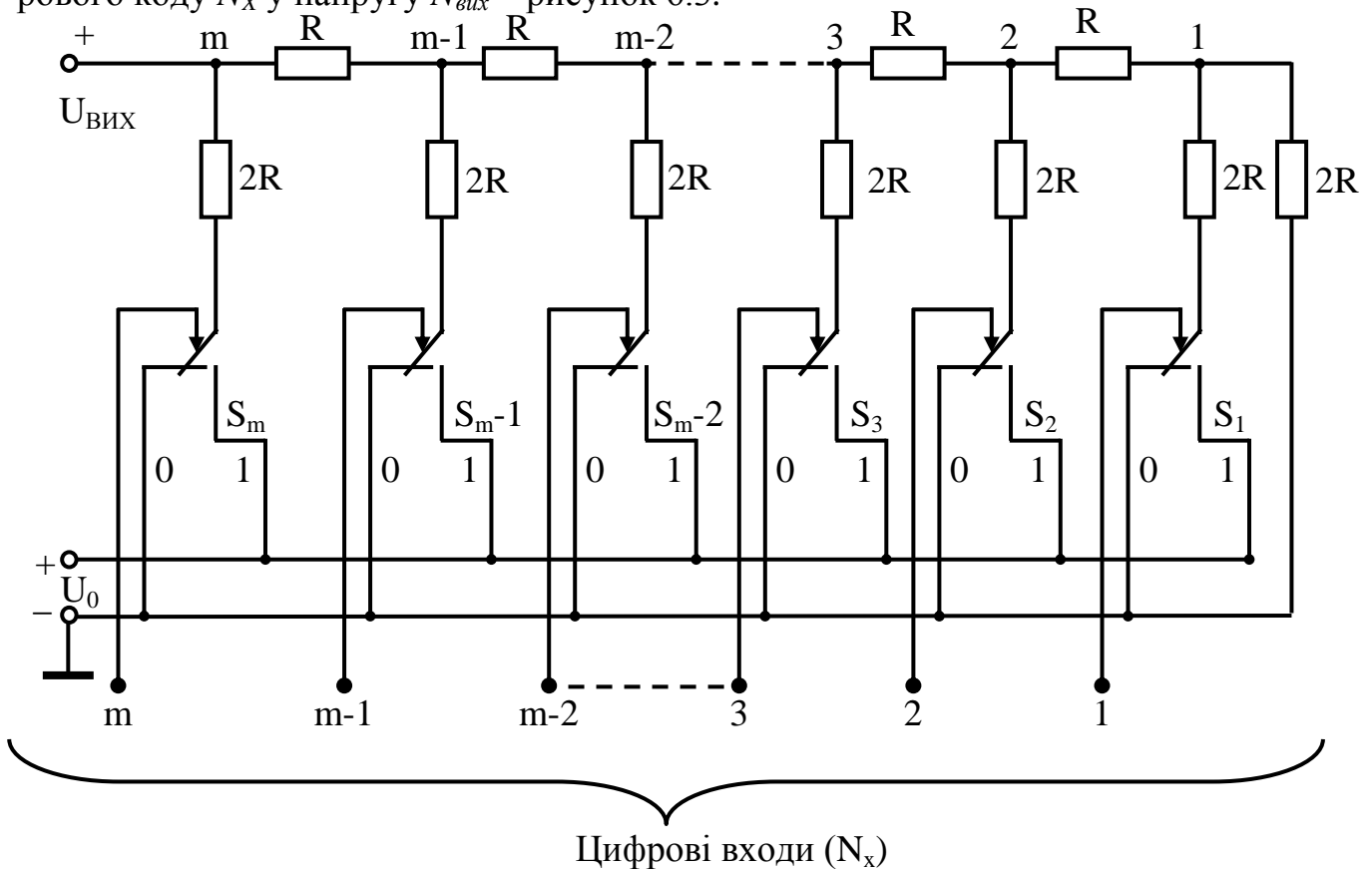


Рисунок 6.3 – Схема ЦАП з ланцюговою сіткою R-2R резисторів

У кожній вузловій точці від 1 до m опори між певною точкою та спільними шинами в усіх трьох напрямках дорівнюють $2R$, тому потенціал i -тої точки ($i=1, 2, \dots, m$) при увімкненні одного i -того перемикача S_i в положенні «1» дорівнює

$$U_i = \frac{U \cdot R}{2 \cdot R + \frac{4 \cdot R \cdot R}{2 \cdot R + 2 \cdot R}} = \frac{1}{3} \cdot U_0, \quad (6.3)$$

де U_0 – напруга джерела опорної напруги.

При перемиканні m -го ключа S_m у положення «1» (при надходженні на цифровий вхід надійде сигнал «1» двійкового коду N_X) напруга $N_{вих}$ на виході ЦАП (див. рисунок 6.4) дорівнюватиме

$$U_{вих} = \frac{1}{3} \cdot U_0, \quad (6.4)$$

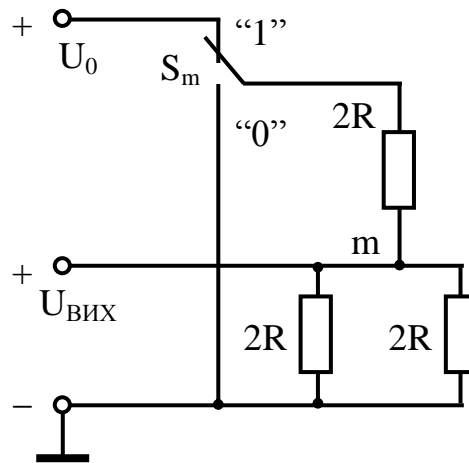


Рисунок 6.4 - Схема ЦАП з ланцюговою сіткою R-2R резисторів при перемиканні m -го ключа S_m у положення «1»

При увімкненні кожного наступного ключа S_i напруга на виході ЦАП порівняно з потенціалом точки m буде зменшена в 2^{m-1} разів, а саме

$$U_{вих(i)} = \frac{1}{3} \cdot U_0 \cdot \frac{2^i}{2^m}, \quad (6.5)$$

де m – кількість двійкових розрядів ЦАП;

i – порядковий номер цифрового входу ЦАП, на який надходить сигнал «1» двійкового коду N_X .

Вхідна напруга ЦАП визначається за формулою

$$U_{вих} = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_0}{2^m} \cdot \sum_{i=1}^m 2^i \cdot a_i, \quad (6.6)$$

де a_i – вагові коефіцієнти, при цьому $a_i = 0$, якщо ключ знаходиться в положенні «0», $a_i = 1$, якщо ключ знаходиться в положенні «1».

Так як опір навантаження $R_{нав}$, на яке працює ЦАП, певною мірою шунтує його, то доцільно підключити ЦАП до навантаження через вимірювальний підсилювач з вхідним і малим вихідним опорами – рисунок 6.5.

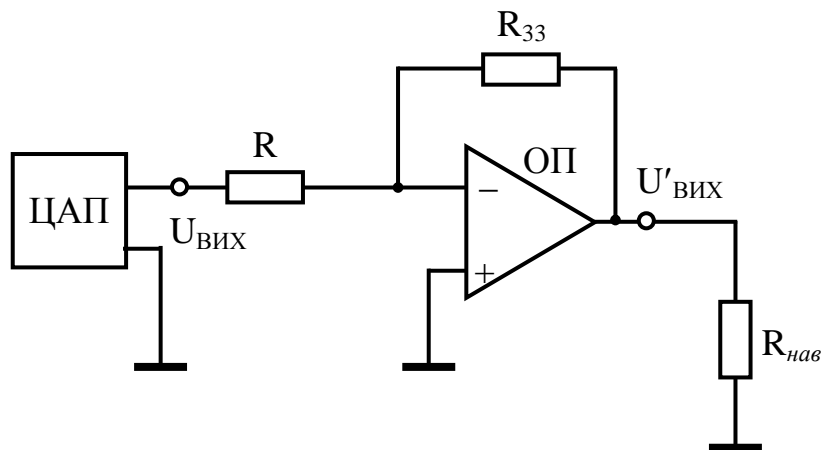


Рисунок 6.5 – Схема підключення ЦАП до навантаження через вимірювальний підсилювач ОП

Приклад 6.2. Визначити вихідну напругу ЦАП, якщо на його вхід надійшов двійковий кодовий сигнал $N_X = 101011$.

Оскільки на 1-му, 2-му, 4-му та 6-му входах «1», а на 3-му і 5-му – «0», то $a_1 = a_2 = a_4 = a_6 = 1$ й $a_3 = a_5 = 0$. Отже, за формулою (6.6)

$$U_{вих} = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_0}{2^6} \cdot (1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^6) = \frac{1}{3} \cdot \frac{86}{64} \cdot U_0 \approx 0,45 \cdot U_0.$$

Абсолютне значення мінімального кроку зміни вихідної напруги визначається як максимальним значенням 2^{m-1} вхідного коду, так і максимальним значенням вихідної напруги ЦАП. Серед динамічних параметрів ЦАП істотним є час встановлення вихідного сигналу $t_{вст}$ і максимальна частота перетворень $f_{пер}$. Час $t_{вст}$ визначається як інтервал часу від надходження вхідного коду N_X до входження вихідного сигналу у межі зони похибки навколо необхідного рівня аналогового сигналу. Максимальна частота перетворень $f_{пер}$, яка визначає швидкість ЦАП – це найбільша частота надходження вхідного коду, при якому параметри ЦАП відповідають заданим значенням.

6.4 Цифрові прилади для вимірювання електричних величин

Залежно від виду вимірюваних величин ЦВП діляться на:

- вольтметри постійного та змінного струму;
- вимірювачі частоти та інтервалу часу;
- омметри та мости постійного та змінного струму;
- комбіновані прилади – мультиметри;
- вимірювачі потужності;
- фазометри;
- спеціалізовані ЦВП, які призначені для вимірювання температури, витрати, швидкостей, механічних напружень.

Електричні сигнали передаються, перетворюються (наприклад, підсилюються, фільтруються), відображаються, зберігаються, та опрацьовуються, тому під час вимірювання величини необхідно перетворити за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів на електричні сигнали, найчастіше на інтенсивність напруги U_x , частотно-часові параметри сигналів (на частоту f_x чи тривалість імпульсів T_x) параметри електричних кіл (електричний опір R_x , індуктивність L_x чи ємність C_x), які далі перетворюються на інтенсивність напруги чи частотно-часові параметри.

На рисунку 6.6 подано структурну схему цифрового мультиметра, який призначений для вимірювання напруги постійного струму U_{\approx} , постійного струму I_{\approx} , напруги змінного струму U_{\sim} , змінного струму I_{\sim} , опору R та інших фізичних величин X , перетворених на напругу постійного струму. Вимірювані величини під'єднуються до окремих входів мультиметра U_{\approx} , I_{\approx} , U_{\sim} , I_{\sim} , R, \dots , X , а рід вимірюваної величини, а також її піддіапазон вимірювання вибирають за допомогою перемикача ПРП. Кожну з вимірюваних величин або масштабний перетворювач U_{\approx}/U_{\approx} , або перетворювачі роду фізичної величини U_{\sim}/U_{\approx} , I_{\sim}/U_{\approx} , $R/U_{\approx}, \dots$, X/U_{\approx} перетворюють на уніфікований сигнал напруги U_{\approx} постійного струму, яку, своєю чергою, за допомогою АЦП перетворюють на кодовий сигнал n_x і подають до блока керування БК.

Функціональну схему сучасного цифрового (процесорного) приладу показано на рисунку 6.7. 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 пристрої живлення приладу.

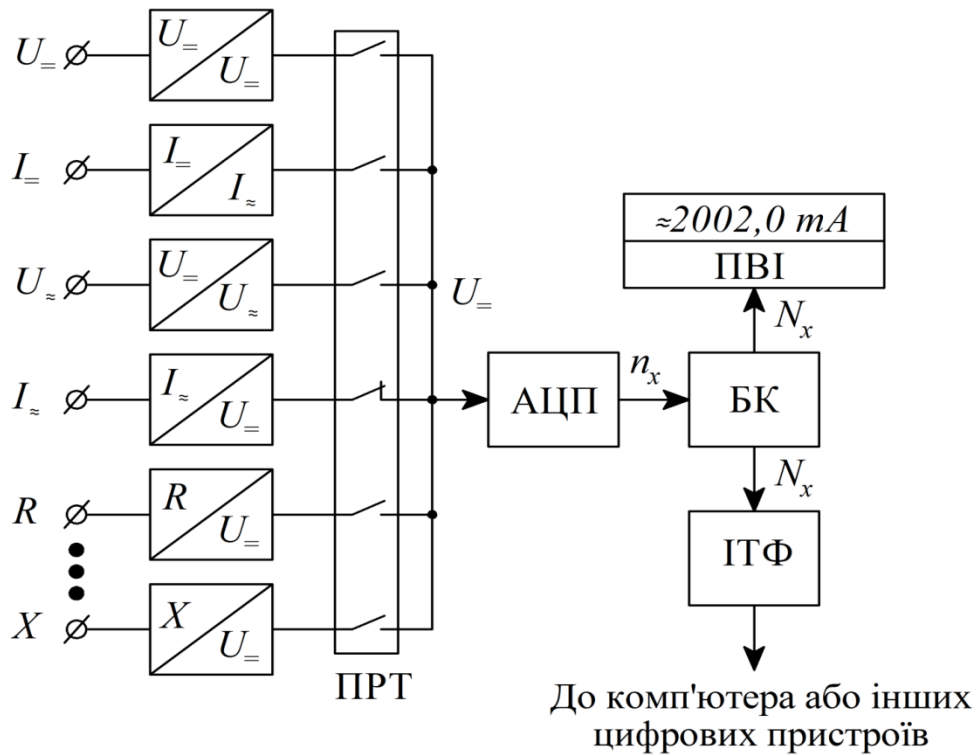


Рисунок 6.6 - Структурна схема цифрового мультиметра

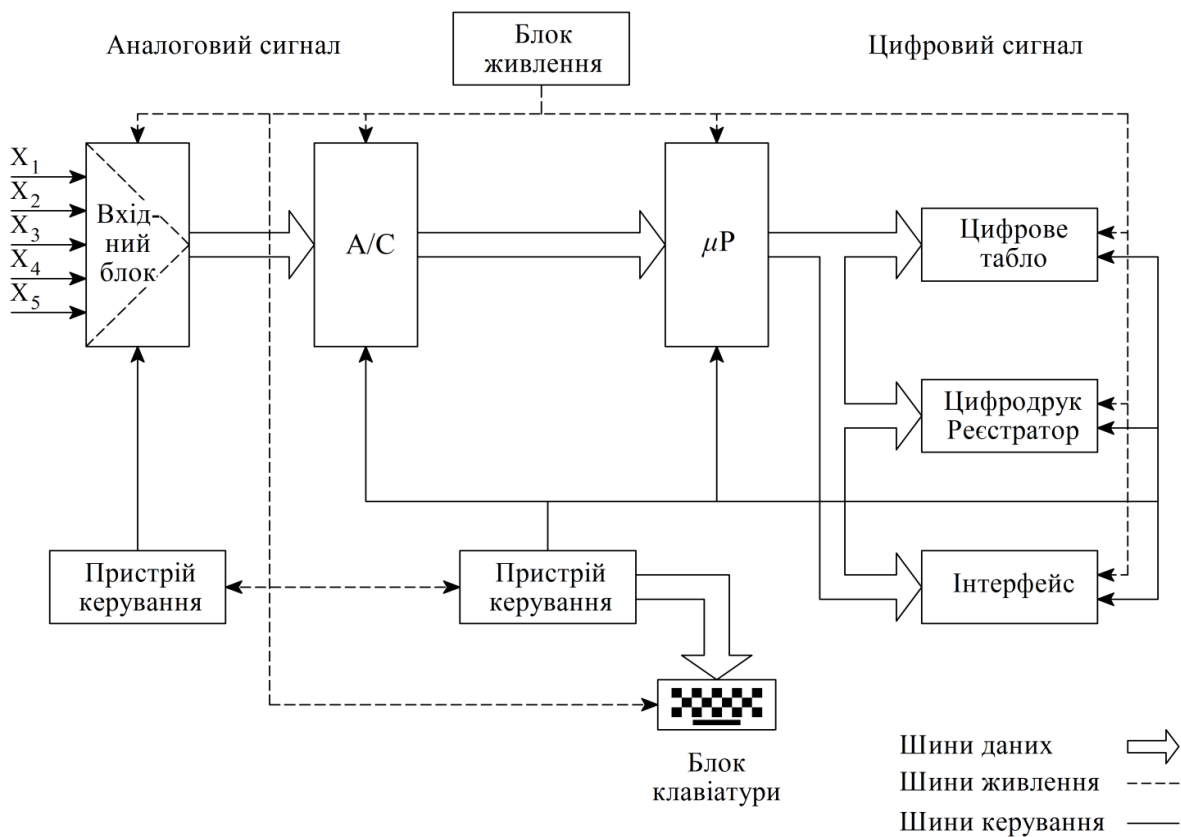


Рисунок 6.7 - Функціональна схема сучасного цифрового (процесорного) приладу

За допомогою різних перетворень вхідної величини значення вихідного сигналу вхідного блока доводять до номінального діапазону перетворення АЦП. Останні, здебільшого, виготовляються на заданий діапазон вхідної напруги, наприклад, у діапазонах 0-1 В, 0-2 В, 0-5 В, 0-10 В або у двополярних діапазонах.

Тому незалежно від роду і виду вихідного сигналу вимірювального перетворювача (сенсора) на виході вхідного пристрою повинен формуватись 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 – *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 здійснюють в мікропроцесорі відповідно до вибраної програми та команд, що можна вводити з клавіатури. Результати можна відображувати у різній формі, запам'ятовувати, реєструвати чи пересилати іншим користувачам.

Зазвичай аналогова та цифрова частини приладу гальванічно розділені (оптичним чи трансформаторним зв'язком), що забезпечує високий рівень захисту від завад спільного виду.

6.5 Мікропроцесорні цифрові вимірювальні прилади

Розвиток цифрових вимірювальних приладів спрямований на вдосконалення їх метрологічних характеристик та на розширення функціональних можливостей. Застосування мікропроцесорів (МП) в цифрових приладах в інтегральному виконанні змінило підходи до проектування багатofункціональних ЦВП.

Мікропроцесор – це пристрій, який містить одну або декілька великих інтегральних схем та виконує роль центрального процесора, тобто автоматично оброблює інформацію відповідно до заданої програми. Мініатюрні габарити, незначна маса та мале споживання енергії відкрили можливість введення мікропроцесора безпосередньо в електронну схему ЦВП.

На рисунку 6.8 наведена структурна схема типового МП. Арифметично-логічний пристрій (АЛП) виконує арифметичні та логічні операції: додавання, віднімання, пересилання типу «регістр-регістр», «регістр-пам'ять», «регістр-

зовнішній пристрій». Блок внутрішніх реєстрів (БВР) використовується як внутрішня пам'ять МП для тимчасового зберігання даних і команд.

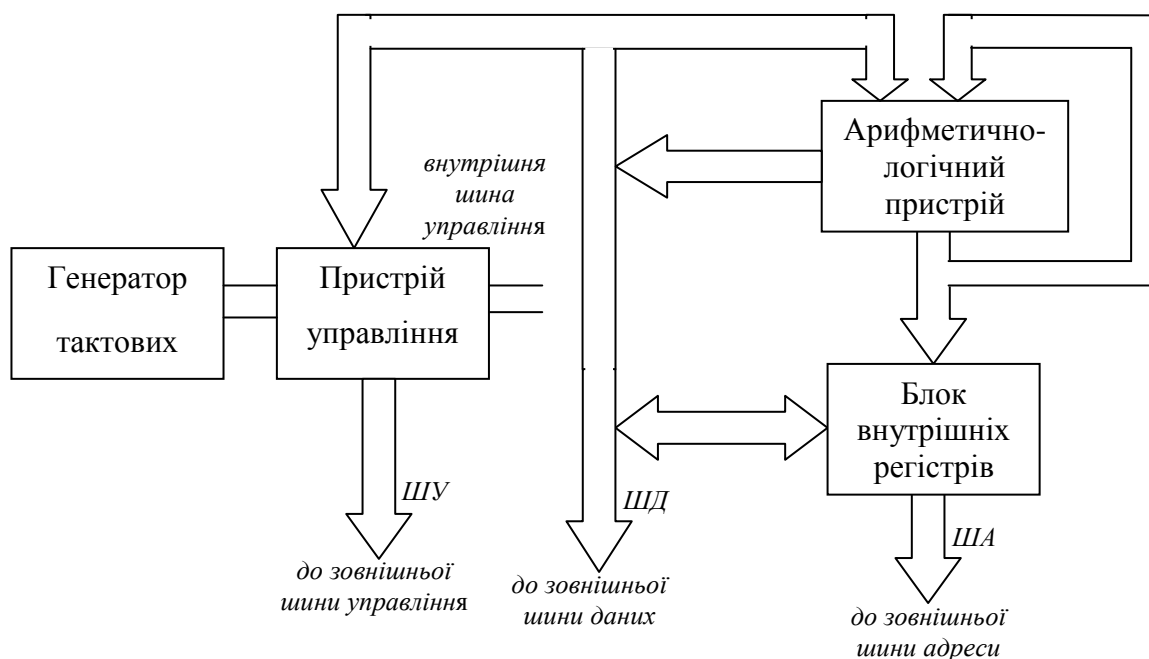


Рисунок 6.8 - Структурна схема типового МП

Пристрій управління (ПУ), синхронізований генератором тактових імпульсів (ГТІ), керує роботою АЛП, БВР, а також потоками інформації. Мікропроцесор має внутрішню шинну організацію, яка переходить у зовнішні шини: шину управління (ШУ), шину даних (ШД) і шину адреси (ША). *Системна шина* – це з'єднувальні лінії, що поєднують однойменні виводи всіх блоків МП. По кожній лінії може бути передане значення одного розряду двійкового коду у вигляді рівня напруги, наприклад, +0,3 В і +2,4 В, що відповідає логічному «0» і логічній «1».

Мікропроцесорна система містить мікропроцесор (МП), пристрій постійної пам'яті (ППП), пристрій оперативної пам'яті (ПОП), інтерфейс зовнішніх пристроїв (ІЗП), шину адреси, шину даних, шину управління. Мікропроцесор – це основа мікропроцесорної системи. Пристрій постійної пам'яті призначений для зберігання програми, яка складається на стадії виготовлення системи, і констант. Вміст ППП не може біти «стертий», його можна тільки «читати». Пристрій оперативної пам'яті (ПОП) використовується для зберігання даних, що опрацьовуються в поточних операціях. ПОП дає змогу не тільки зчитувати дані, але й записувати нові. Після вимкнення напруги живлення інформація, що міститься в ПОП, зникає.

Інтерфейс – це сукупність електричних, механічних і програмних засобів, що дають змогу з'єднувати блоки системи між собою та із зовнішніми при-

стройствами. Зокрема, інтерфейс зовнішніх пристроїв (ІЗП) служить для спряження (з'єднання) МП з цифровими вимірювальними приладами.

Мікропроцесорна система працює так: МП запускається генератором тактових імпульсів ГТІ. Для того, щоб МП виконував якісь дії, на його входи необхідно подавати відповідні команди. Сукупність команд, записаних у певній послідовності, становить програму, яка зберігається в ППП. Кожна команда складається з коду операції та адреси, тобто повідомляє, яку треба виконати операцію, і вказує на місце в пам'яті, де розміщені дані, що опрацьовуються. З приходом кожного наступного тактового імпульсу МП «витягає» з ППП чергову команду, аналізує (дешифрує) її, виробляє сигнал управління, взаємодіє з ПОП, де зберігаються проміжні дані, виконує арифметичні та логічні операції, звертається до ППП, якщо це входить до змісту команди, і починає все спочатку.

Використання у вимірювальній техніці мікропроцесорів і мікропроцесорних систем зумовило виникнення нового класу цифрових програмованих багатоканальних вимірювальних приладів, які мають назву «логіри» (реєстратори даних).

Мікропроцесорна система керує всією послідовністю операцій під час роботи приладу. Режим роботи приладу встановлюється клавіатурою на пульті оператора, де вибирається вимірювана величина, режим вимірювань і діапазон вимірювань. Сигнали з клавіатури за допомогою шифратора перетворюються в цифрові коди. МП відповідно до підпрограми встановлення режиму аналізує дані з клавіатури, порівнює їх з константами із ППП, і виробляє коди управління. Інформація, що вводиться з клавіатури, відображається на пристрої індикації - дисплеї.

Вимірювана величина, яка надходить на один із входів приладу, комутатором подається на АЦП, де перетворюється у цифровий код. Сформовані в АЦП коди надходять в МП, де здійснюється їх обробка відповідно до програми. Зокрема, корекція похибок приладу, а також його калібрування, здійснюються при надходженні від МП відповідного коду на комутатор для підключення до АЦП вмонтованої у прилад «міри» (наприклад, джерела зразкової напруги). Код в АЦП, що відповідає значенню міри, надходить в МП і порівнюється з константою із ППП, а далі обчислюється значення поправки, яка враховується при опрацюванні даних.

Результати вимірювань, крім індикації на дисплеї, можуть фіксуватись на друкарському пристрої, а також за допомогою ЦАП перетворюватись у відповідні аналогові сигнали і подаватись на графопобудувач.

Використання МП у вимірювальній техніці дає змогу значно підвищити точність і надійність приладів, розширити їх функціональні можливості, розв'язувати задачі, які у традиційних ЦВП взагалі не розглядались.

Точність приладів підвищується внаслідок корекції систематичної похибки, зокрема, автоматичного встановлення «нуля» перед початком вимірювань, автоматичного виконання операції градування (самокалібрування), а також зменшення впливу випадкових похибок здійсненням багаторазових вимірювань з подальшим усередненням їх результатів, виявлення та виключення грубих похибок. Крім цього, МП здійснює лінеаризацію функції перетворення первинних вимірювальних перетворювачів, автоматичний вибір межі вимірювання, каналу вимірювання (вимірюваної величини) тощо.

Доцільно використовувати МП для виконання опосередкованих, сукупних і сумісних вимірювань. За командою з клавіатури МП вибирає режим вимірювання, запам'ятовує необхідні результати обчислення та видає значення вимірюваної фізичної величини на дисплей.

Виконуючи цілий ряд вимірювальних операцій, МП дає змогу зменшити кількість компонентів у схемі приладу, внаслідок чого досягається мініатюризація та економічність засобів вимірювань, підвищується їх надійність і скорочуються терміни розробки. У мікропроцесорних приладах передбачена можливість підключення до стандартної інтерфейсної шини, тобто сукупність приладів можна поєднувати в єдину вимірювальну систему – вимірювально-обчислювальний комплекс.

Контрольні запитання при вивченні теми 6

1. Який вимірювальний прилад є цифровим?
2. Охарактеризуйте основні функціональні вузли цифрового вимірювального приладу?
3. Як класифікуються за видом вимірюваних величин цифрові вимірювальні прилади?
4. Що таке аналого-цифровий перетворювач?
5. Який перетворювач є цифро-аналоговим?
6. Охарактеризуйте універсальні цифрові вимірювальні прилади.
7. Опишіть структуру мікропроцесорного цифрового вимірювального приладу.
8. Які властивості притаманні цифровим вимірювальним приладам з мікропроцесорами.

Список літератури

1. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
2. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
3. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 656 с.
4. Блецкан Д.І. Електричні вимірювання: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / За редакцією професора Д. І. Блецкана. – Ужгород.: ВАТ «Видавництво «Закарпаття», 2008. – 400 с.

ТЕМА 7. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН (частина 1)

План лекції

- 7.1 Загальні положення вимірювань електричних величин
- 7.2 Вимірювання струму і напруги. Схеми вимірювань
- 7.3 Вимірювання потужності. Схеми вимірювань
- 7.4 Вимірювання електричної енергії. Схеми вимірювань

7.1 Загальні положення вимірювань електричних величин

Струм і напруга є найпоширенішими величинами, які необхідно вимірювати в широкому діапазоні. Засобами вимірювань постійного струму і напруги є амперметри (мікро-, мілі-, кілоамперметри) і вольтметри (мікро-, мілі-, кіловольтметри) різних систем, а також компенсатори постійного струму та компаратори напруг.

Для вимірювання дуже малих постійних струмів (від 10^{-25} А до 10^{-7} А) і напруг (від 10^{-5} В до 10 В) застосовують електрометри та електронні фотогальванометричні прилади.

Вимірюють великі постійні струми переважно магнітоелектричними та цифровими амперметрами із зовнішніми шунтами, а великі постійні напруги – магнітоелектричними вольтметрами із зовнішніми додатковими резисторами, електростатичними і цифровими вольтметрами із подільниками напруги.

При вимірюваннях змінних струмів і напруг вимірюваними величинами можуть бути їх миттєві, амплітудні, середні, середньовипрямлені та середньоквадратичні значення. У практиці електричних вимірювань найчастіше вимірюють параметри струмів і напруг синусоїдної форми, які переважно характеризують середньоквадратичним (діючим) значенням. Тому то переважну більшість засобів вимірювань змінних струмів і напруг градуують у середньоквадратичних діючих значеннях для синусоїдної форми кривої струму або напруги.

Робочими засобами вимірювань змінних струмів і напруг є амперметри (мікро-, мілі-, кілоамперметри) і вольтметри (мікро-, мілі-, кіловольтметри) різних систем, а також компенсатори змінного струму, компаратори напруг, реєструвальні прилади та електронні осцилографи.

Найпоширенішими є засоби вимірювань середньоквадратичних значень сигналів. Вимірюють середньоквадратичні значення (СКЗ) змінних струмів і напруг електродинамічними, електромагнітними, випрямними, аналоговими електронними і цифровими амперметрами і вольтметрами, а також електростатичними вольтметрами. Для вимірювань СКЗ малих змінних струмів ($I < 1$ мА)

переважно застосовують цифрові, аналогові електронні і випрямні амперметри, а малих змінних напруг ($U < 10 \text{ мВ}$) – аналогові електронні вольтметри.

Найкращі метрологічні характеристики, а саме, найвищу точність і найменше власне споживання потужності, при вимірюванні СКЗ змінних струмів і напруг в діапазоні середніх значень (для струму – від одиниць міліампер до десятків ампер; для напруги – від десятків мілівольт до 1 кВ) мають цифрові та електродинамічні прилади.

Вимірюють великі змінні струми ($I > 30 \text{ А}$) і напруги ($U > 1000 \text{ В}$) переважно електродинамічними, електромагнітними приладами із зовнішніми вимірювальними трансформаторами струму і напруги. Прямі вимірювання великих змінних напруг (до 75 кВ) здійснюють електростатичними вольтметрами.

Миттєві значення змінних струмів і напруг вимірюють реєструвальними приладами, електронними та електромеханічними осцилографами.

Середнє значення та амплітудне значення вимірюють випрямними й електронними приладами.

Потужність є основною характеристикою більшості фізичних об'єктів, процесів та явищ, тому її вимірювання займає важливе місце серед методів вимірювань фізичних величин. У сучасній вимірювальній практиці доводиться вимірювати потужності від часток нВт (потужність сигналів радіолокаційних станцій) до десятків ГВт (потужність сучасних електричних станцій).

Методи вимірювання потужності істотно відрізняються один від одного залежно від виду і значення вимірюваної величини, частотного діапазону та параметрів кола, в якому здійснюються вимірювання. Специфічною є сама вимірювана величина – *потужність*, що безпосередньо не впливає на вимірювальний перетворювач, а впливають напруга U , струму I та значення кута зсуву фаз φ між ними. У зв'язку з цим всі вимірювання потужності поділяються на дві групи – *прямі* та *опосередковані* методи.

У разі *прямих* вимірювань активної потужності результат вимірювання пропорційний добутку вхідних величин - U , I та $\cos \varphi$, реалізують такі вимірювань за допомогою електродинамічних, феродинамічних, електронних аналогових і цифрових ватметрів, і застосовують для вимірювань всіх видів потужності як на постійному, так і на змінному струмі.

У разі *опосередкованих* вимірювань активної P , реактивної Q та повної S потужностей вимірюють вхідні величини U , I та $\cos \varphi$ чи $\sin \varphi$, а результат вимірювання отримують за допомогою обчислень за відомими в електротехніці формулами. Найчастіше опосередковані вимірювання реалізують за допомогою амперметра і вольтметра та застосовують для вимірювань потужності постійного струму P і повної потужності змінного струму S .

На низьких частотах (до 10 кГц) використовують електродинамічні та феродинамічні ватметри, а на підвищених і високих частотах – електронні аналогові ватметри: ватметри з електростатичним вимірювальним механізмом і підсилювачами струму та напруги (до 100 кГц), ватметри з перетворювачами Холла (до 100 МГц). Усім перерахованим електромеханічним та електронним ватметрам властива невисока точність – клас точності становить 0,1 і нижче.

Вищу точність мають цифрові ватметри (похибка не перевищує $\pm 0,01\%$), а також високу точність, швидкодію та мають широкий діапазон вимірювання, надійність та технологічність, але їм властивий неширокий частотний діапазон (до 10 кГц).

У галузі вимірювань електричних і магнітних величин необхідність вимірювання кута зсуву фаз виникає у випадках:

- між напругою і струмом у колі однофазного споживача змінного струму;
- між вхідними та вихідними напругами і струмами чотириполюсників (трансформаторів, підсилювачів та фільтрів);
- між струмами і напругами симетричної трифазної системи.

У сучасній практиці доводиться вимірювати електричний опір у дуже широкому діапазоні значень – від наноом до значень близько 10^{17} Ом і більше, при цьому для вимірювання з порівняно невисокою точністю використовують прилади прямого перетворення, точні вимірювання здійснюють за допомогою вимірювальних мостів, компенсаторів постійного струму та цифрових приладів. Залежно від границь вимірювань всі омметри розділяють на такі групи: *мікроомметри*, нижня границя яких дорівнює 10^{-5} Ом ; *міліомметри*, нижня границя яких дорівнює 10^{-3} Ом ; *омметри*, нижня границя яких дорівнює 10 мОм ; *кілоомметри*, верхня границя яких дорівнює 1 МОм ; *мегаомметри*, верхня границя яких дорівнює 1000 МОм ; *тераомметри*, верхня границя яких дорівнює більш, ніж 10^9 Ом .

Залежно від принципу дії аналогові омметри поділяють на три групи: *омметри з магнітоелектричним вимірювальним механізмом*, *омметри з логометричним вимірювальним механізмом* та *електронні аналогові омметри*.

Цифрові омметри входять до складу комбінованих цифрових вимірювальних приладів (*мультиметрів*), які призначені для вимірювань постійного струму і напруги, змінного струму і напруги та електричного опору.

Діапазон вимірювань опорів цифрових омметрів широкий – від 10^{-3} Ом до 10^{12} Ом , але він вужчий, ніж у мостів постійного струму та аналогових омметрів. Цифровим омметрам властива висока точність вимірювання, так в діапазоні опорів $1 \dots 10^6 \text{ Ом}$ мінімально можливе значення відносної похибки вимірювання становить $\pm 0,005 \%$.

Діапазони вимірювань параметрів елементів кіл змінного струму (*вимірювань* R , L , C) досить широкі і становлять для ємності $10^{-8} \dots 10^4$ мкФ, для тангенса кута втрат $\operatorname{tg} \delta$ $10^{-5} \dots 10$ та для індуктивності $10^{-7} \dots 10^3$ Гн, для добротності котушки Q $10^{-2} \dots 10^3$. Точність вимірювань залежить від методів і засобів вимірювань та від значень вимірюваних величин.

Методи безпосередньої оцінки реалізують за допомогою аналогових електромеханічних і електронних та цифрових вимірювачів R , C , L . Аналогові електромеханічні вимірювальні прилади безпосередньої оцінки застосовують для вимірювання ємності – *фарадметри*, які і будують на основі логометричних вимірювальних механізмів електродинамічної системи, та на основі приладів випрямної системи у складі комбінованих приладів (тестерів).

Високу точність та швидкодію мають *цифрові вимірювачі* R , C , L , які побудовані на принципі прямого перетворення параметрів комплексного опору в пропорційні значення напруги, частоти або інтервалу часу з подальшим аналого-цифровим перетворенням цих проміжних величин і вимірюванням їх значень. Такі прилади мають назву *мультиметри* – комбіновані універсальні вимірювальні прилади.

Найточнішими приладами для вимірювання параметрів конденсаторів та котушок індуктивності є *мости змінного струму*, які, крім основних параметрів C та L , призначені також для вимірювання тангенса кута втрат $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторів та добротності Q котушок індуктивності. Похибки вимірювань мостами змінного струму можуть становити тисячні частки відсотка у широкому діапазоні значень вимірюваних величин.

Опосередковані вимірювання параметрів R , C , L здійснюють методами *двох приладів* (амперметра і вольтметра) або *трьох приладів* (амперметра, вольтметра і ватметра), *резонансним методом* (куметрами) та *методом перетворення параметрів* R , C , L *в напругу* за допомогою електронних перетворювачів.

Частоту вимірюють спеціальними приладами – *частотомірами*, на основі метода безпосередньої оцінки і методами порівняння. Методи безпосередньої оцінки реалізують за допомогою аналогових електромеханічних і електронних та цифрових частотомірів.

7.2 Вимірювання струму і напруги. Схеми вимірювань

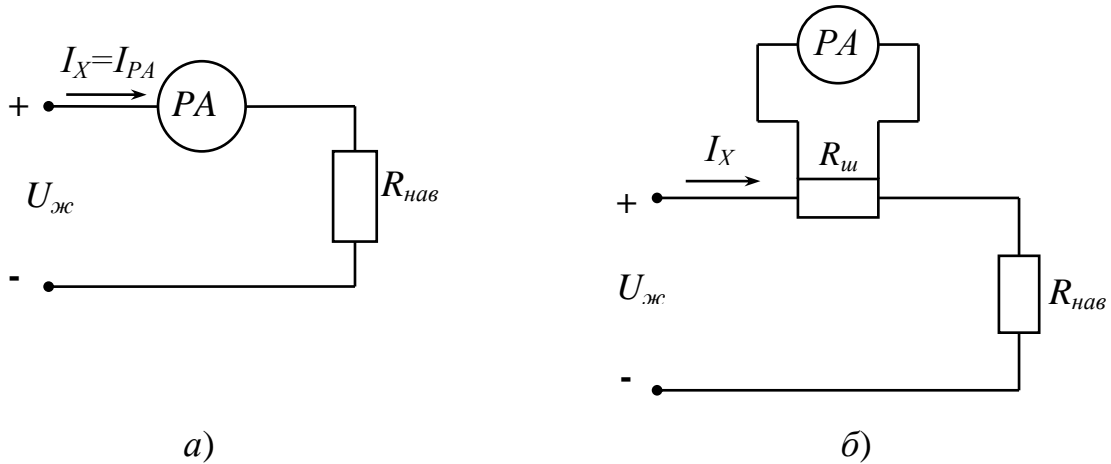
Найпоширенішими вимірювання струму є *прямі вимірювання*, коли аналоговий чи цифровий амперметр вмикають послідовно із споживачем $R_{\text{нав}}$, струм I_X в якому необхідно виміряти, а результат вимірювань отримують безпосередньо за показами амперметра

$$I_X = I_{PA} = C_{PA} \cdot N_{PA}, \quad (7.1)$$

де C_{PA} – стала амперметра;

N_{PA} – положення покажчика на шкалі приладу.

На рисунку 7.1.а наведена схема прямого вимірювання постійного струму амперметром, а на рисунку 7.1.б – схема вимірювання постійного струму амперметром із зовнішнім шунтом.



а – пряме вимірювання постійного струму амперметром;

б - вимірювання постійного струму амперметром із зовнішнім шунтом

Рисунок 7.1 – Схема вимірювання постійного струму

Для розширення діапазону вимірювання амперметрів у бік великих струмів використовують шунти – рисунок 7.1.б.

Результат вимірювань у такому разі визначають безпосередньо за показами амперметра із зовнішнім шунтом $R_{ш}$

$$I_X = I_{PA} \cdot p = C_{PA} \cdot p \cdot N_{PA}, \quad (7.2)$$

де p – коефіцієнт шунтування.

Для вимірювань постійних струмів призначені електронні та цифрові прилади. Важливими позитивними властивостями електронних приладів є їх широкий діапазон (від пікоампер до десятків ампер), мале споживання енергії від об'єкта дослідження і висока точність: клас точності електронних приладів 0,2, а цифрових 0,002. Перевагами цифрових приладів є висока швидкодія, автоматичний вибір діапазону вимірювань, визначення полярності вимірюваної величини, а також можливість передавання і реєстрації результатів вимірювань.

Найпоширенішими вимірюваннями напруги у колах постійного струму є *прямі вимірювання* напруги, коли аналоговий або цифровий вольтметр вмикають паралельно із споживачем $R_{нав}$ чи ділянкою кола, напругу U_X на якій необ-

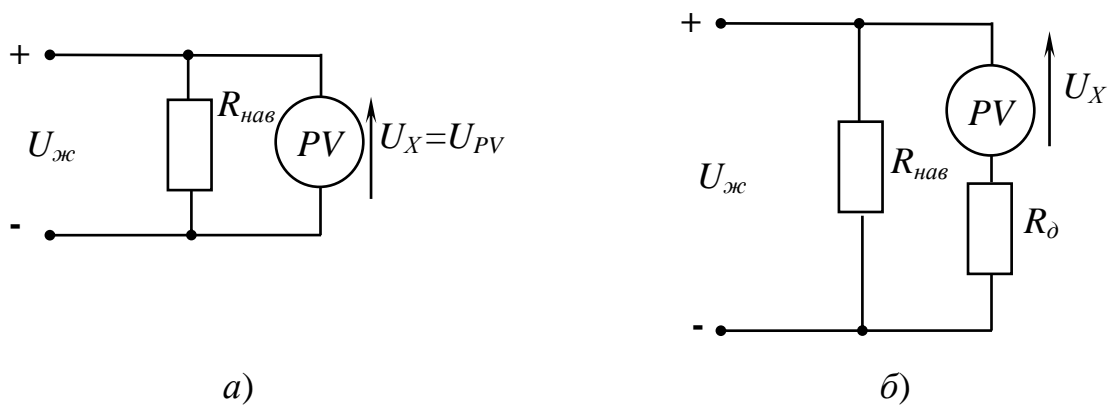
хідно виміряти. Результат вимірювань отримують безпосередньо за показами вольтметра

$$U_X = U_{PV} = C_{PV} \cdot N_{PV}, \quad (7.3)$$

де C_{PV} – стала вольтметра;

N_{PV} – положення покажчика на шкалі приладу.

На рисунку 7.2.а наведена схема прямого вимірювання напруги в колах постійного струму вольтметром, а на рисунку 7.2.б – схема вимірювання напруги в колах постійного струму вольтметром із додатковим резистором.



а)

б)

а – схема прямого вимірювання напруги вольтметром;

б - схема вимірювання напруги вольтметром із додатковим резистором

Рисунок 7.2 – Схема вимірювання напруги в колах постійного струму

Для розширення діапазону вимірювання аналогових вольтметрів у бік великих напруг використовують додаткові резистори – рисунок 7.2.б, а цифрових вольтметрів – подільники напруги. Результат вимірювань у такому разі визначають безпосередньо за показами вольтметра із додатковим резистором R_d

$$U_X = U_{PA} \cdot n = C_{PV} \cdot n \cdot N_{PV}, \quad (7.4)$$

де n – коефіцієнт розширення.

Як і при вимірюванні постійного струму, найпоширенішими є прямі вимірювання однофазного змінного струму, коли аналоговий чи цифровий амперметр вмикають послідовно із споживачем Z_H , струм I_X в якому необхідно виміряти – рисунок 7.3.а. Результат вимірювання у такому разі, як і при вимірюванні постійного струму, визначають за формулою (7.1) відповідно до показу амперметра.

Розширюють діапазон вимірювання амперметрів змінного струму за допомогою вимірювальних трансформаторів струму. Вимірювання здійснюється за схемою, яка наведена на рисунку 7.3.б. Споживач, струм I_X в якому необхідно виміряти, при цьому підключається послідовно з первиною обмоткою «Л1» -

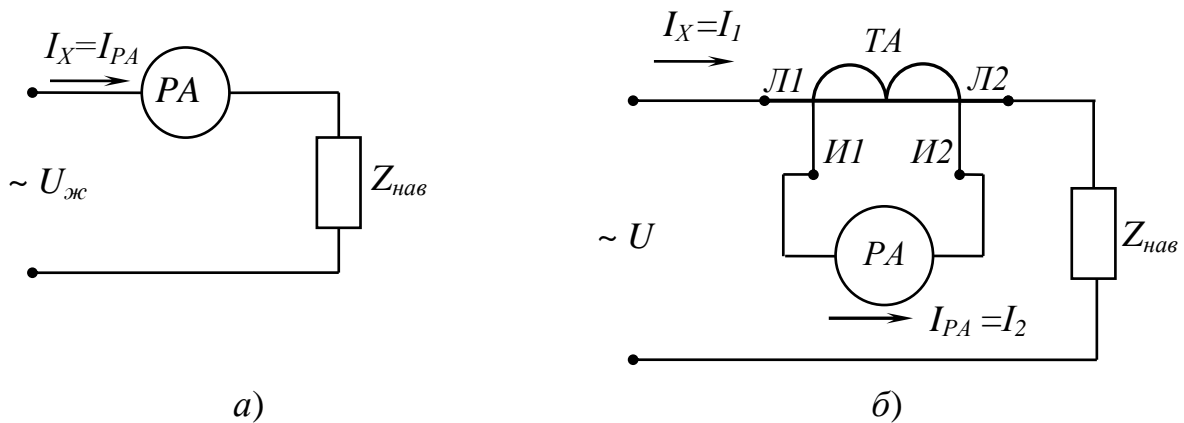
«Л2» трансформатора струму TA , а амперметр PA під'єднують до вторинної обмотки «И1» - «И2» трансформатора струму ТА.

Значення вимірюваного струму I_X знаходять за формулою

$$I_X = I_{PA} \cdot k_{IH} = I_{PA} \cdot \frac{I_{1H}}{I_{2H}}, \quad (7.5)$$

де k_{IH} – номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму;

I_{1H} , I_{2H} – номінальні значення первинного та вторинного струмів вимірювального трансформатора струму відповідно.



а)

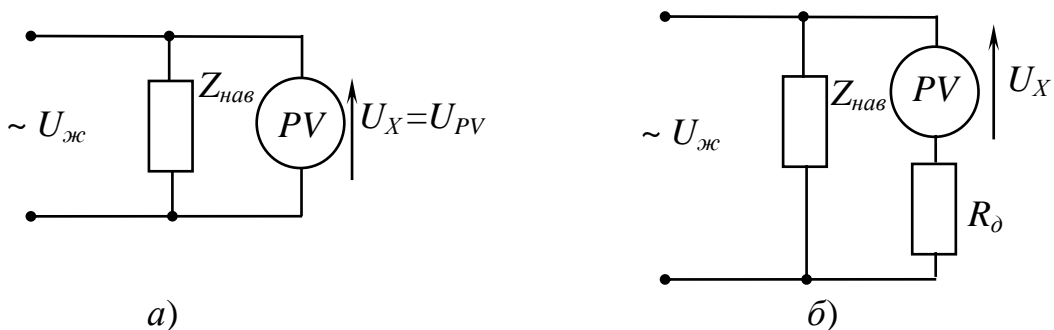
б)

а - схема прямого вимірювання амперметром;

б - схема вимірювання амперметром із вимірювальним трансформатором струму

Рисунок 7.3 – Схема вимірювання однофазного змінного струму

Як і при вимірюванні напруги постійного струму, найпоширенішими вимірюваннями напруги однофазного змінного струму є прямі вимірювання напруги однофазного змінного струму, коли аналоговий чи цифровий вольтметр вмикають паралельно із споживачем Z_H чи ділянкою кола, напругу U_X на якому необхідно виміряти – рисунок 7.4.а.



а)

б)

а - схема прямого вимірювання напруги;

б - схема вимірювання напруги вольтметром із додатковим резистором

Рисунок 7.4 - Схема вимірювання напруги в однофазному колі змінного струму

Схема вимірювання напруги змінного струму вольтметром із зовнішнім додатковим резистором наведена на рисунку 7.4.б. В електроенергетиці здійснюються вимірювання напруги при вищих напругах ($U > 1000 \text{ В}$), тому то для розширення діапазону вимірювання вольтметрів змінного струму використовують вимірювальні трансформатори напруги TV – рисунок 7.5.

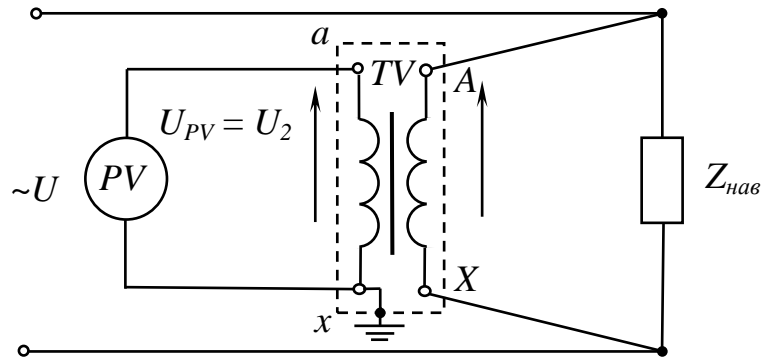


Рисунок 7.5 – Схема вимірювання напруги в однофазному колі змінного струму вольтметром із вимірювальним трансформатором напруги

До споживача $Z_{нав}$, спад напруги U_X , на якому необхідно виміряти, паралельно підключається первинна обмотка «А» - «Х» вимірювального трансформатора напруги TV, а вольтметр під'єднують до вторинної обмотки «а» - «х» трансформатора. Корпус та затискач «х» вторинної обмотки заземлюють.

Значення вимірюваної напруги U_X знаходять за формулою

$$U_X = U_{PV} \cdot k_{UH} = U_{PV} \cdot \frac{U_{1H}}{U_{2H}}, \quad (7.6)$$

де k_{UH} – номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги;

U_{1H} , U_{2H} – номінальні значення первинної та вторинної напруги вимірювального трансформатора напруги відповідно.

Вимірювання струмів і напруг у трифазних колах має особливості.

У несиметричних трифазних колах кожен вимірювану величину – фазні I_ϕ або лінійні I_L струми та фазні U_ϕ та лінійні U_L напруги можна вимірювати відповідним амперметром або вольтметром. Тому кількість необхідних засобів вимірювань дорівнює кількості вимірюваних величин. Але виходячи із аналізу кожного конкретного трифазного кола, кількість засобів вимірювань можна зменшити.

При вимірюваннях у симетричних трифазних колах достатньо виміряти струм чи напругу тільки в одній фазі (лінії), так як всі лінійні (фазні) струми та напруги рівні. Взаємозв'язок між лінійними і фазними струмами та напругами, а також кількість засобів вимірювань залежить від схеми увімкнення трифазних

споживачів – «зірка» чи «трикутник». У симетричних трифазних колах цей взаємозв'язок визначається співвідношеннями:

- при увімкненні споживачів за схемою «зірка»

$$I_{Л} = I_{\phi}; \text{ та } U_{Л} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}; \quad (7.7)$$

- при увімкненні споживачів за схемою «трикутник»

$$I_{Л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}; \text{ та } U_{Л} = U_{\phi}. \quad (7.8)$$

Згідно співвідношення (7.7) для вимірювання лінійних (фазних) струмів у симетричних трифазних колах при увімкненні споживачів за схемою «зірка» достатньо використати один амперметр PA – рисунок 7.6.

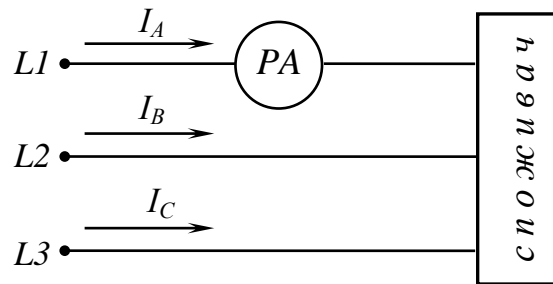


Рисунок 7.6 – Схема вимірювання лінійних (фазних) струмів одним амперметром у симетричному трифазному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка»

Значення вимірюваних лінійних (фазних) струмів визначаються за формулою

$$I_A = I_B = I_C = I_{PA}. \quad (7.7)$$

Згідно співвідношення (7.8) у симетричних трифазних колах при увімкненні споживачів за схемою «трикутник» для вимірювання фазних струмів використовується один амперметр PA_{ϕ} , а для вимірювання лінійних струмів також достатньо застосувати один амперметр $PA_{Л}$ – рисунок 7.7.

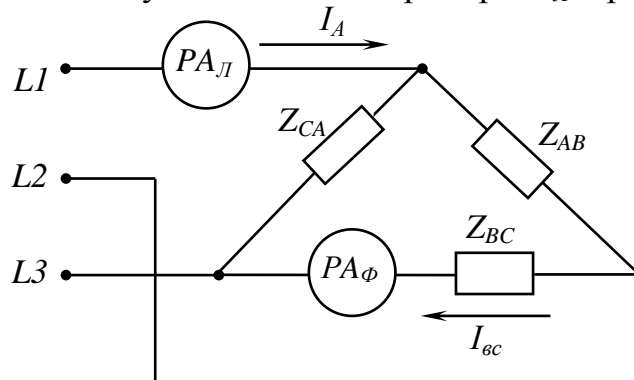


Рисунок 7.7 – Схема вимірювання лінійних та фазних струмів у симетричному трифазному колі при увімкненні споживачів за схемою «трикутник»

Значення вимірюваних лінійних струмів визначаються за формулою

$$I_A = I_B = I_C = I_{PA_{Л}} \quad (7.8)$$

Значення вимірюваних фазних струмів визначаються за формулою

$$I_{ав} = I_{вс} = I_{са} = I_{PA_{Ф}} \quad (7.9)$$

У несиметричних трифазних колах при вимірюванні лінійних (фазних) струмів при увімкненні споживачів за схемою «зірка» використовуються три амперметри $PA1 \dots PA3$ – рисунок 7.8.

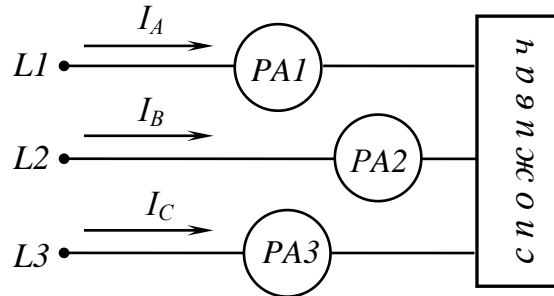


Рисунок 7.8 – Схема вимірювання лінійних (фазних) струмів трьома амперметрами у несиметричному трифазному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка»

Значення вимірюваних лінійних (фазних) струмів визначаються за формулами

$$I_A = I_{PA1}; \quad I_B = I_{PA2}; \quad I_C = I_{PA3}. \quad (7.10)$$

У несиметричних трифазних трипровідних колах при вимірюванні струмів із застосуванням вимірювальних трансформаторів струму застосовується схема з трьома амперметрами та двома трансформаторами струму – рисунок 7.9.

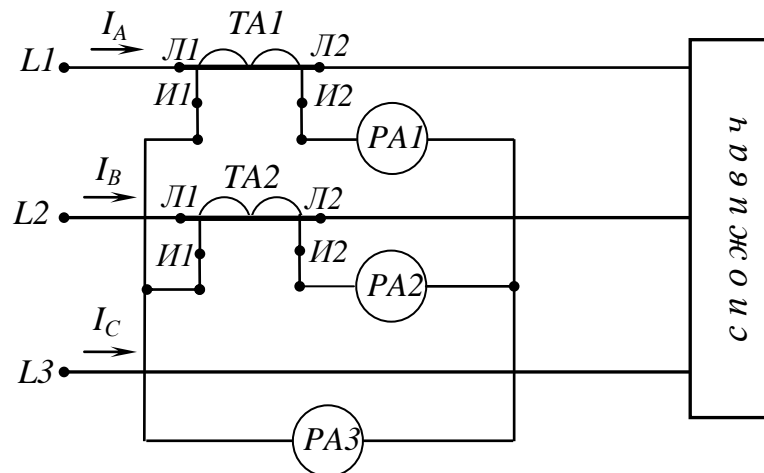


Рисунок 7.9 - Схема вимірювання струмів з трьома амперметрами та двома трансформаторами струму у несиметричних трифазних трипровідних колах

Так як номінальні коефіцієнти трансформації k_{IH} вимірювальних трансформаторів струму $TA1$, $TA2$ однакові, тому то покази I_{PA1} та I_{PA2} амперметрів $PA1$ та $PA2$ будуть пропорційні до діючих значень лінійних струмів I_A та I_B , які дорівнюють

$$I_A = I_{PA1} \cdot k_{IH}; \quad I_B = I_{PA2} \cdot k_{IH}. \quad (7.11)$$

Амперметр $PA3$ ввімкнений так, що його показ I_{PA3} дорівнює сумі показів амперметрів $PA1$ та $PA2$, тобто $I_{PA3} = I_{PA1} + I_{PA2}$, та з урахуванням виразів (7.11) пропорційний до діючого значення лінійного струму I_C , який визначається за формулою

$$I_C = I_A + I_B = I_{PA3} \cdot k_{IH}. \quad (7.12)$$

У несиметричних трифазних чотирипровідних колах при вимірюванні струмів із застосуванням вимірювальних трансформаторів струму застосовується схема з чотирма амперметрами та трьома трансформаторами струму – рисунок 7.10.

Так як номінальні коефіцієнти трансформації k_{IH} вимірювальних трансформаторів струму $TA1...TA3$ однакові, тому то покази $I_{PA1}...I_{PA3}$ амперметрів $PA1...PA3$ будуть пропорційні до діючих значень лінійних струмів I_A , I_B , I_C , які дорівнюють

$$I_A = I_{PA1} \cdot k_{IH}; \quad I_B = I_{PA2} \cdot k_{IH}; \quad I_C = I_{PA3} \cdot k_{IH}. \quad (7.13)$$

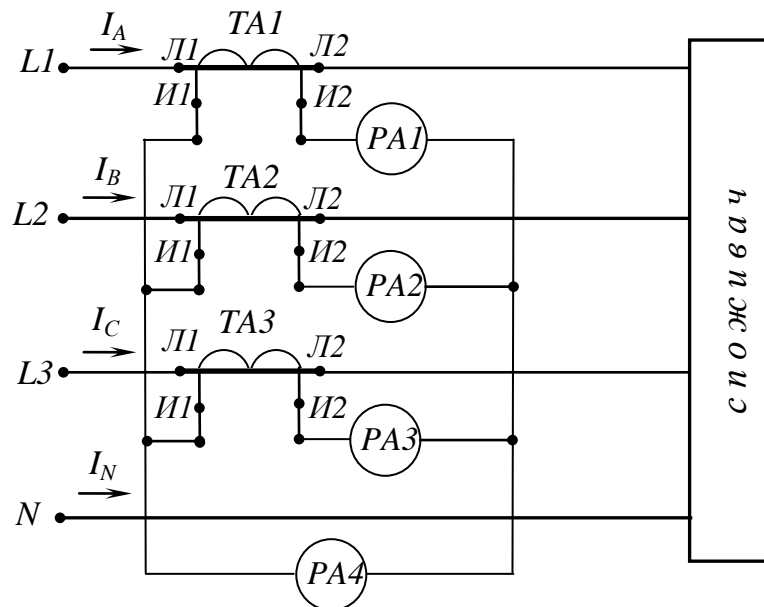


Рисунок 7.10 - Схема вимірювання струмів з чотирма амперметрами та трьома трансформаторами струму у несиметричних трифазних чотирипровідних колах

Амперметр $PA4$ увімкнений так, що його показ I_{PA4} дорівнює сумі показів амперметрів $PA1 \dots PA3$, тобто $I_{PA4} = I_{PA1} + I_{PA2} + I_{PA3}$, та з урахуванням виразів (7.13) пропорційний до діючого значення струму I_N , який визначається за формулою

$$I_N = I_A + I_B + I_C = I_{PA4} \cdot k_{III}. \quad (7.14)$$

В симетричному трифазному трипровідному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка» для вимірювання лінійних напруг використовується один вольтметр PV_L , а для вимірювання фазних напруг також достатньо застосувати один вольтметр PV_ϕ – рисунок 7.11.

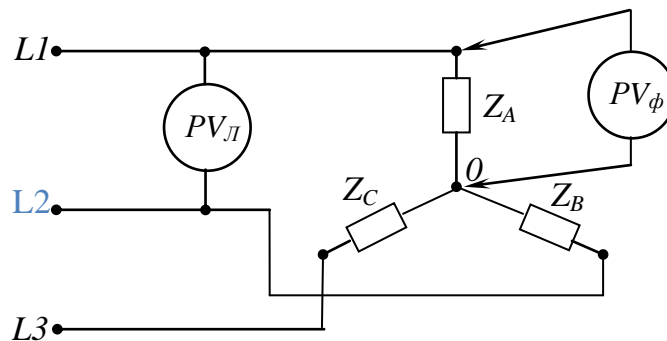


Рисунок 7.11 – Схема вимірювання лінійних та фазних напруг у симетричному трифазному трипровідному колі змінного струму при увімкненні споживачів за схемою «зірка»

Значення вимірюваних лінійних напруг визначаються за формулою

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{PV_L}. \quad (7.15)$$

Значення вимірюваних фазних напруг визначаються за формулою

$$U_A = U_B = U_C = U_{PV_\phi}. \quad (7.16)$$

У симетричному трифазному чотиріпровідному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка» для вимірювання лінійних напруг використовується один вольтметр PV_L , а для вимірювання фазних напруг також достатньо застосувати один вольтметр PV_ϕ – рисунок 7.12.

Значення вимірюваних лінійних напруг визначаються за формулою (7.15), а значення вимірюваних фазних напруг визначаються за формулою (7.16).

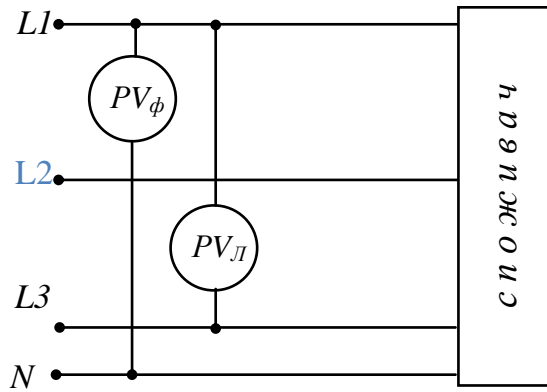


Рисунок 7.12 – Схема вимірювання лінійних та фазних напруг у симетричному трифазному чотирипровідному колі змінного струму

В симетричних трифазних колах при увімкненні споживачів за схемою «трикутник» для вимірювання лінійних (фазних) напруг використовується один вольтметр PV – рисунок 7.13.

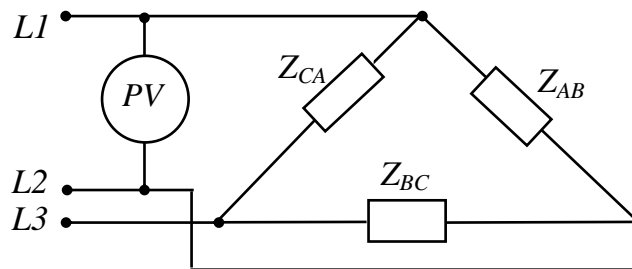


Рисунок 7.13 - Схема вимірювання лінійних (фазних) напруг у симетричному трифазному трипровідному колі змінного струму при увімкненні споживачів за схемою «трикутник»

Значення вимірюваних лінійних (фазних) напруг визначаються за формулою

$$U_A = U_B = U_C = U_{PV}. \quad (7.17)$$

У несиметричних трифазних трипровідних колах при вимірюванні лінійних напруг використовуються три вольтметри – рисунок 7.14.

Значення вимірюваних лінійних (фазних) напруг визначаються за формулою

$$U_{AB} = U_{PV1}; \quad U_{BC} = U_{PV2}; \quad U_{CA} = U_{PV3}. \quad (7.18)$$

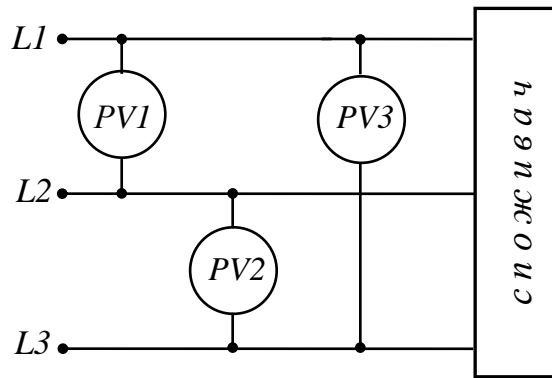


Рисунок 7.14 - Схема вимірювання лінійних напруг у несиметричному трифазному трипровідному колі змінного струму

У несиметричних трифазних трипровідних колах при вимірюванні фазних напруг із застосуванням вимірювальних трансформаторів напруги використовується схема з трьома вольтметрами та двома вимірювальними трансформаторами напруги – рисунок 7.15.

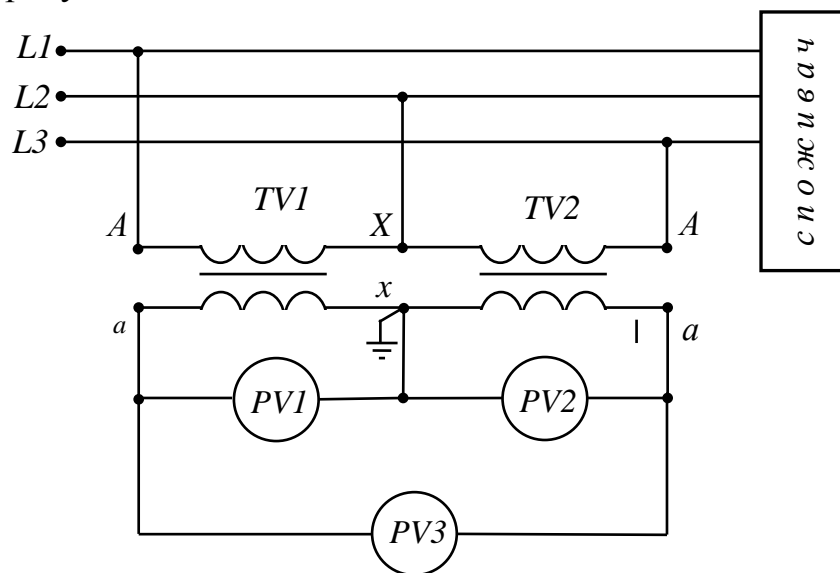


Рисунок 7.15 – Схема вимірювання лінійних напруг у несиметричному трифазному колі із застосуванням вимірювальних трансформаторів напруги

Так як номінальні коефіцієнти трансформації k_{UH} вимірювальних трансформаторів напруги $TV1$, $TV2$ однакові, тому то покази $U_{PV1} \dots U_{PV3}$ вольтметрів $PV1 \dots PV3$ будуть пропорційні до діючих значень лінійних напруг U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , які дорівнюють

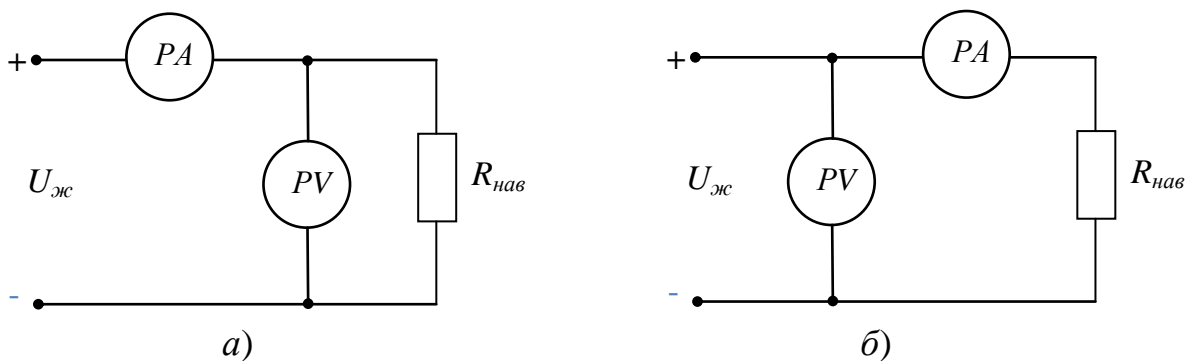
$$U_{AB} = U_{PV1} \cdot k_{UH}; \quad U_{BC} = U_{PV2} \cdot k_{UH}; \quad U_{CA} = U_{PV3} \cdot k_{UH}. \quad (7.19)$$

7.3 Вимірювання потужності. Схеми вимірювань

Активну потужність у колах постійного струму визначають опосередковано вимірюванням напруги та струму за допомогою вольтметра і амперметра відповідно

$$P_X = I_{PA} \cdot U_{PV}. \quad (7.20)$$

На рисунку 7.16 наведені дві схеми увімкнення приладів для вимірювання активної потужності у колах постійного струму. Схема на рисунку 7.16.а, має назву *правильного вимірювання напруги* і застосовується для вимірювання у колах споживачів з малим опором. Схема на рисунку 7.16.б, має назву *правильного вимірювання струму* і застосовується для вимірювання у колах споживачів з великим опором.



а) - схема правильного вимірювання напруги;
б) - схема правильного вимірювання струму

Рисунок 7.16 - Схема вимірювання активної потужності у колах постійного струму

Активна потужність споживача, яка обчислена за показами приладів, які увімкнені за схемою правильного вимірювання напруги, дорівнює

$$P_X = I_{PA} \cdot U_{PV} - \frac{U_{PV}^2}{R_{PV}}. \quad (7.21)$$

де P_{PV} – потужність, яку споживає вольтметр.

Активна потужність споживача, яка обчислена за показами приладів, які увімкнені за схемою правильного вимірювання струму, дорівнює

$$P_X = I_{PA} \cdot U_{PV} - I_{PA}^2 \cdot R_{PA}. \quad (7.22)$$

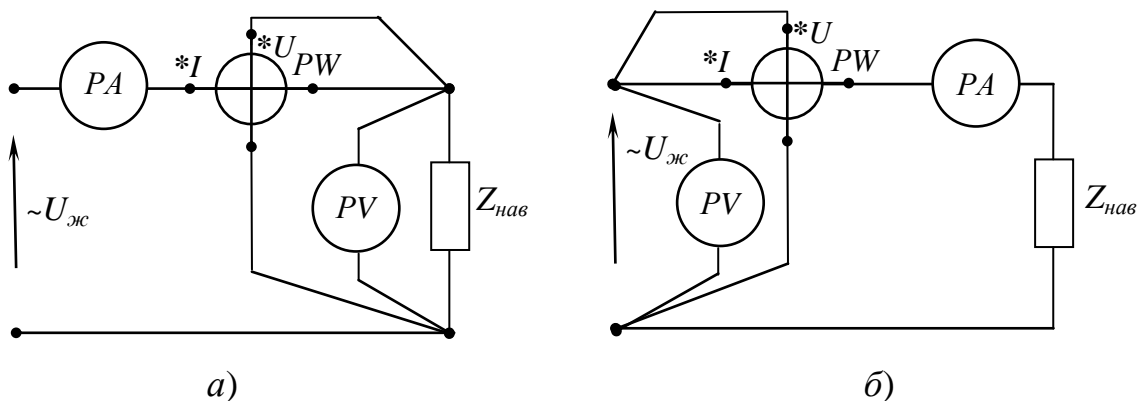
Для вимірювання сили струму і напруги на споживачі можна застосовувати компенсатор постійного струму або компаратор напруг, що дає змогу значно підвищити точність вимірювань, крім цього при компенсаційному методі

вимірювання повністю відсутнє споживання потужності компенсатором від джерела сигналу, тобто методична похибка дорівнює нулю.

Таким чином, компенсатори постійного струму і компаратори напруг використовують для особливо точних вимірювань потужності, а саме, для метрологічної повірки ватметрів.

Недоліком опосередкованих вимірювань потужності методом амперметра і вольтметра є невисока точність і низька продуктивність праці, так як необхідно здійснювати вимірювання спочатку струму, потім напруги, а потім виконувати обчислення.

Для вимірювання активної потужності в колах постійного та однофазних колах змінного струму на частотах до 10 кГц використовують електродинамічні та феродинамічні ватметри, а на вищих частотах – електронні аналогові ватметри. Ватметри вмикають за схемою правильного вимірювання напруги – див. рисунок 7.17.а, або за схемою правильного вимірювання струму – див. рисунок 7.17.б. Наявність у цих схемах вольтметра і амперметра дає змогу не тільки уникнути перевантаження кіл ватметра, а й опосередковано визначати низку додаткових параметрів споживача, таких, як повна потужність, коефіцієнт потужності та еквівалентний опір.



а) - схема правильного вимірювання напруги;
б) - схема правильного вимірювання струму

Рисунок 7.17 - Схема прямого вимірювання активної потужності ватметром у однофазних колах змінного струму

Потужність, яка виміряна ватметром, визначається за формулою

$$P_{PW} = C_{PW} \cdot N_{PW} = \frac{U_{K.PW} \cdot I_{K.PW} \cdot \cos \varphi_{H.PW}}{N_{PW \max}} \cdot N_{PW}, \quad (7.23)$$

де C_{PW} – стала ватметра;

N_{PW} – відлік за шкалою ватметра;

U_{KPW} , I_{KPW} - границі вимірювання ватметра за напругою і струмом відповідно;

$\cos \varphi_{H.PW}$ – номінальний коефіцієнт потужності ватметра;
 N_{PWmax} – максимальний відлік за шкалою ватметра.

Найпоширеніші однофазні лабораторні ватметри мають такі метрологічні характеристики: $U_{KPW} = 30; 75; 150; 300; 450; 600 \text{ В}; I_{KPW} = 0,01; 0,02; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10 \text{ А}; ()$; $\cos \varphi_{H.PW} = 1,0; 0,1$; клас точності = $0,1; 0,2; 0,5$. Слід відзначити, що в залежності від модифікації ватметри виготовляють на дві границі вимірювання за струмом із наведеного вище ряду, наприклад, $0,01$ і $0,02 \text{ А}; \dots 5$ та 10 А . Ватметри, в яких $\cos \varphi_{H.PW} = 0,1$ є малокосинусними і їх використовують переважно для вимірювання потужності споживачів, у яких $\cos \varphi_X < 0,5$, а у випадку, коли $\cos \varphi_X \geq 0,5$ застосовують ватметри з $\cos \varphi_{H.PW} = 1$.

Для розширення границь вимірювання ватметрів на змінному струмі застосовують вимірювальні трансформатори струму та вимірювальні трансформатори напруги – рисунки 7.18 та 7.19 відповідно. Схему, яка наведена на рисунку 7.18, використовують для вимірювання активної потужності споживачів за напругою ($U_X \leq 600 \text{ В}$), якщо струм споживача I_X перевищує границю вимірювання ватметра за струмом $I_{K.PW}$, при цьому $I_X > I_{K.PW}$ або, навпаки, є набагато меншим від неї ($I_X \ll I_{K.PW}$).

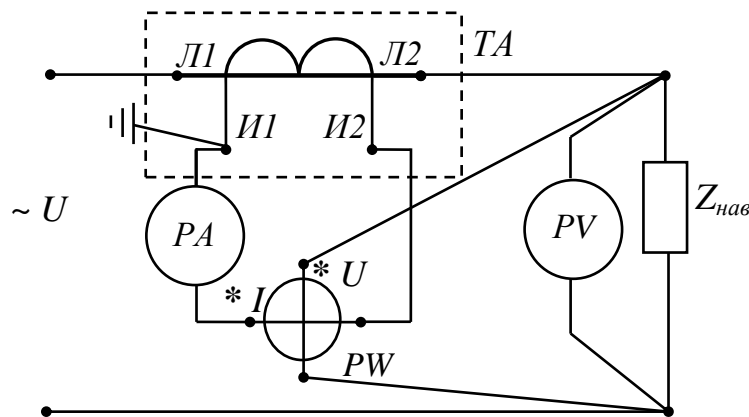


Рисунок 7.18 – Схема вимірювання активної потужності і струму однофазних споживачів з використанням вимірювального трансформатора струму

Виміряні значення активної потужності і струму знаходять за показами ватметра та амперметра з урахуванням номінального коефіцієнта трансформації k_{IH} вимірювального трансформатора струму

$$P = P_{PW} \cdot k_{IH} = C_{PW} \cdot N_{PW} \cdot k_{IH}; \quad (7.24)$$

$$I = I_{PA} \cdot k_{IH} = C_{PA} \cdot N_{PA} \cdot k_{IH}. \quad (7.25)$$

Схему, що наведена на рисунку 7.19, використовують для вимірювання активної потужності споживачів за високої напруги ($U_X > 600 \text{ В}$) та при значеннях струму споживача I_X , який перевищує границю вимірювання ватметра за струмом $I_{K.PW}$, при цьому $I_X > I_{K.PW}$.

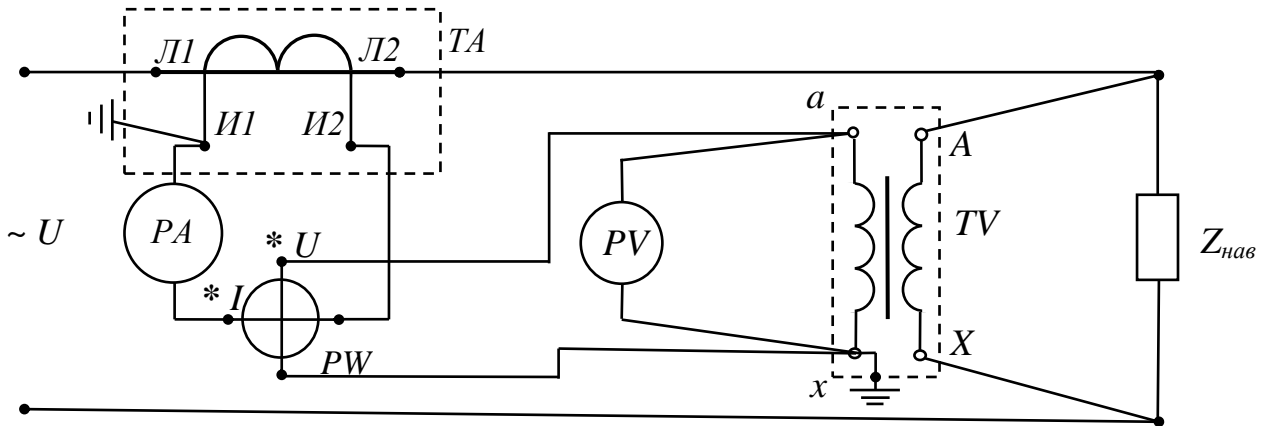


Рисунок 7.19 - Схема вимірювання активної потужності і струму однофазних споживачів з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги

Виміряні значення активної потужності, струму і напруги знаходять за показами ватметра, амперметра і вольтметра з урахуванням номінальних коефіцієнта трансформації k_{IH} вимірювального трансформатора струму та коефіцієнта трансформації k_{UH} вимірювального трансформатора напруги

$$I = I_{PA} \cdot k_{IH} = C_{PA} \cdot N_{PA} \cdot k_{IH}; \quad (7.26)$$

$$U = U_{PV} \cdot k_{UH} = C_{PV} \cdot N_{PV} \cdot k_{UH}; \quad (7.27)$$

$$P = P_{PW} \cdot k_{IH} \cdot k_{UH} = C_{PW} \cdot N_{PW} \cdot k_{IH} \cdot k_{UH}. \quad (7.28)$$

Активну потужність у трифазному колі (як симетричному, так і несиметричному) вимірюють за допомогою ватметрів, які увімкнені на відповідні струми та напруги. У чотирипровідному несиметричному трифазному колі використовують три однофазні ватметри, які увімкнені на фазні струми та напруги – рисунок 7.20.

Виміряне значення активної потужності кола дорівнює сумі показів трьох ватметрів з формулою

$$P_{\text{кола}} = P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}. \quad (7.29)$$

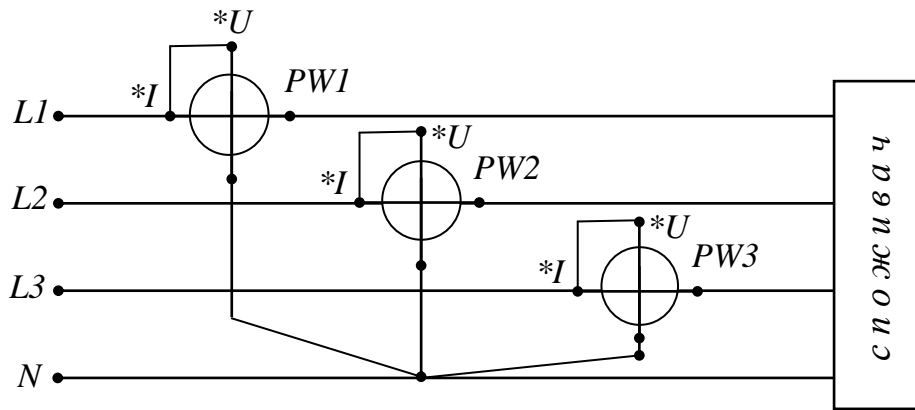


Рисунок 7.20 – Схема вимірювання активної потужності у чотирипровідному несиметричному трифазному колі за методом трьох ватметрів

За умови повної симетрії в чотирипровідній трифазній системі можна застосовувати тільки один ватметр, увімкнений за схемою, що наведений на рисунку 7.20, у будь-яку фазу, показ якого множать на 3 - за кількістю фаз, за формулою

$$P_{\text{кола}} = 3 \cdot P_{PW} \quad (7.30)$$

У три провідному несиметричному трифазному колі для вимірювання активної потужності застосовуються два ватметри, струмові кола яких вмикають у будь-які дві лінії, а кола напруги генераторними кінцями під'єднують до цих самих ліній, а вільними кінцями кіл напруги – до вільної від приладів лінії трифазного кола – рисунок 7.21.

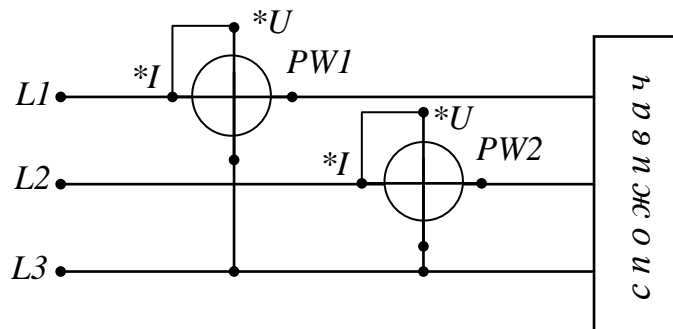


Рисунок 7.21 – Схема вимірювання активної потужності у трипровідному несиметричному трифазному колі за методом двох ватметрів

Вимірні значення активної потужності кола за таким методом дорівнює сумі показів двох ватметрів з формулою

$$P_{\text{кола}} = P_{PW1} + P_{PW2} \quad (7.31)$$

Слід зауважити, що можливі такі режими роботи трифазного кола в залежності від характеру навантаження, коли показчик одного з ватметрів відхиляється ліворуч від нуля, незважаючи на правильне увімкнення ватметра до кола.

Щоб зробити відлік у такому разі та правильно записати вимірне значення активної потужності усього трифазного кола, необхідно змінити напрямок струму в одному з кіл цього ватметра, а його показ записати зі знаком мінус.

Отже, для визначення активної потужності усього трифазного кола змінного струму необхідно враховувати при розрахунках алгебраїчну суму показів ватметрів з урахуванням їх знаків і тому необхідно суворо дотримуватися принципу правильного під'єднання генераторних та вільних затискачів кіл напруги та струму ватметрів.

На практиці поряд з однофазними ватметрами використовують і трифазні ватметри, які дають можливість отримати значення активної потужності трифазного споживача без додаткових обчислень. Такі ватметри поєднують в одному приладі два або три однофазні вимірювальні механізми, які знаходяться на одній спільній осі, на яку діють обертальні моменти, які виникають в одноелементних механізмах. Найбільшого розповсюдження одержали феродинамічні трифазні ватметри. Вмикання ватметрів у трифазне коло здійснюється за тими самими схемами, які аналогічні до відповідних схем вмикання однофазних ватметрів. Через великий обертальний момент феродинамічні ватметри виготовляють у вигляді самописних приладів.

Для розширення границь вимірювання струму струмові кола ватметрів вмикають через вимірювальні трансформатори струму, а при вимірюванні у колах, де напруга перевищує 600 В, застосовують вимірювальні трансформатори струму та напруги – рисунок 7.22.

У такому разі вимірне значення потужності визначається за формулою

$$P_{\text{кола}} = (P_{PW1} + P_{PW2}) \cdot k_{IH} \cdot k_{UH}. \quad (7.32)$$

Наявність реактивної потужності в енергетичних колах, особливо трифазних, досить негативно впливає на роботу споживачів електричної енергії. Тому поряд з вимірюванням активної потужності, необхідно вимірювати й реактивну. Вимірювання реактивної потужності має практичне значення тільки для потужних споживачів електроенергії, які підключаються до трифазних кіл. Тому в однофазних колах реактивна потужність вимірюється тільки в лабораторних умовах при проведенні досліджень. Прилади для вимірювання реактивної потужності в однофазних колах змінного струму не випускаються.

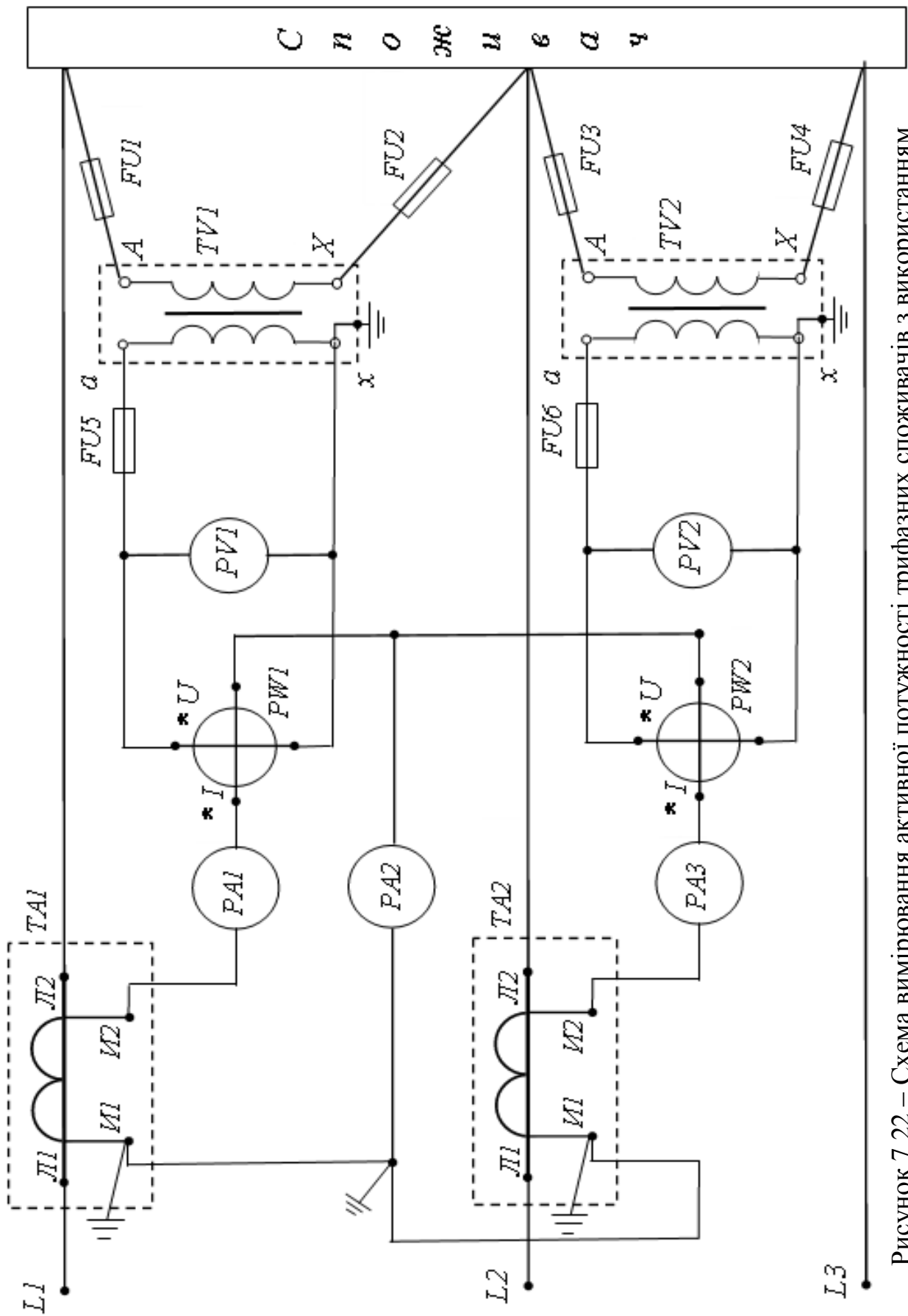


Рисунок 7.22 – Схема вимірювання активної потужності трифазних споживачів з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги

Для вимірювання реактивної потужності у трифазних колах у промислових умовах застосовують *трифазні ватметри* – це вимірювачі реактивної потужності.

Реактивну потужність Q трифазного споживача визначають як суму реактивних потужностей окремих фаз

$$Q_{\text{кола}} = U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi + U_B \cdot I_B \cdot \sin \varphi + U_C \cdot I_C \cdot \sin \varphi. \quad (7.33)$$

З виразу (7.33) можна зробити висновок, що реактивна потужність може бути виміряна такими самими приладами, що й активна, тільки обертальний момент вимірювальних механізмів таких приладів повинен бути пропорційний не значенню $\cos \varphi$, а значенню $\sin \varphi$. Цього можна досягти, увімкнувши прилади за спеціальним схемами. Для того, щоб відхилення рухомої частини електро- чи феродинамічних механізмів ватметрів було пропорційне значенню $\sin \varphi$, на них потрібно подати напругу, що відстає за фазою на кут 90° від напруги, яка подається до приладу при вимірюванні активної потужності.

Розглянемо метод вимірювання реактивної потужності – метод трьох ватметрів. Така схема підключення має назву *схема із заміненими напругами*.

Відомо, що активна потужність трифазного кола дорівнює

$$\begin{aligned} P_{\text{кола}} &= U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi + U_B \cdot I_B \cdot \cos \varphi + U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi; \\ P_{\text{кола}} &= P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}. \end{aligned} \quad (7.34)$$

Для вимірювання реактивної потужності необхідно замінити фазні напруги на лінійні, які відстають на кут 90° згідно схеми, що наведена на рисунку 7.23.

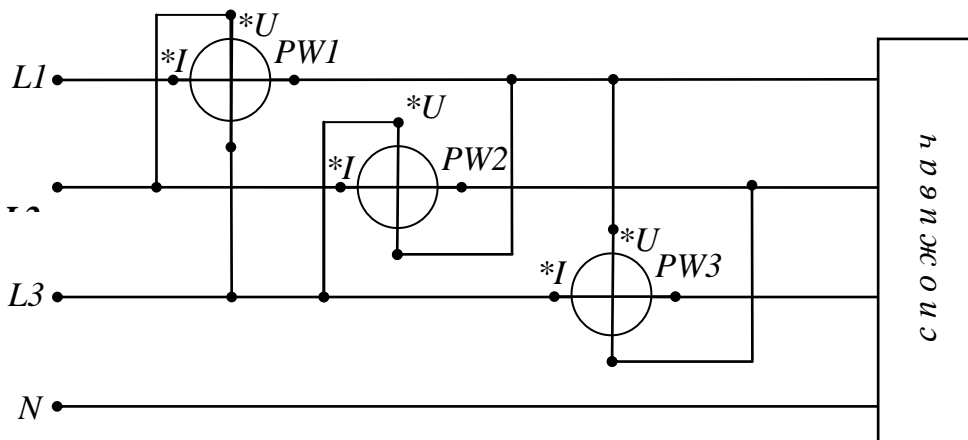


Рисунок 7.23 – Схема вимірювання реактивної потужності трифазних споживачів методом трьох ватметрів

У виразі (7.34) замість фазної напруги U_A повинна бути лінійна напруга U_{BC} , яка відстає від U_A на кут 90^0 , замість фазної напруги U_B - напруга U_{CA} і замість U_C - напруга U_{AB} . Сума показів ватметрів дорівнює

$$P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3} = U_{BC} \cdot I_A \cdot \cos(90^0 - \varphi_A) + U_{CA} \cdot I_B \cdot \cos(90^0 - \varphi_B) + U_{AB} \cdot I_C \cdot \cos(90^0 - \varphi_C). \quad (7.35)$$

Напруги $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$; $U_A = U_B = U_C = U_\phi$; $U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi$.

З урахуванням цього вираз (7.34) буде мати вигляд

$$P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3} = \sqrt{3} \cdot (U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi_A + U_B \cdot I_B \cdot \sin \varphi_B + U_C \cdot I_C \cdot \sin \varphi_C) = \sqrt{3} \cdot Q_{\text{кола}}. \quad (7.36)$$

Реактивна потужність трифазного кола буде дорівнювати

$$Q_{\text{кола}} = \frac{P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}}{\sqrt{3}}. \quad (7.37)$$

Система струмів може бути несиметричною. В дужках виразу (7.36) кожна складова пропорційна реактивній потужності відповідної фази споживача, тому то за показами кожного з ватметрів можна визначати реактивну потужність тієї фази споживача, струм якої протікає через даний ватметр.

Для правильного підключення ватметрів потрібно знати послідовність фаз. Струмові кола кожного ватметра вмикають послідовно в одну з трьох ліній трифазного кола, а затискачі кола напруги приєднують до двох інших ліній, так, щоб генераторний затискач був приєднаний до лінії, яка є наступною у послідовності фаз ABCABC... за тією фазою, до якої увімкнено струмове коло приладу.

Розглянемо метод вимірювання реактивної потужності – метод двох ватметрів, які увімкнені за схемою зі штучним нулем – рисунок 7.24. Метод застосовується у трифазних три провідних колах за умови повної симетрії чи часткової несиметрії.

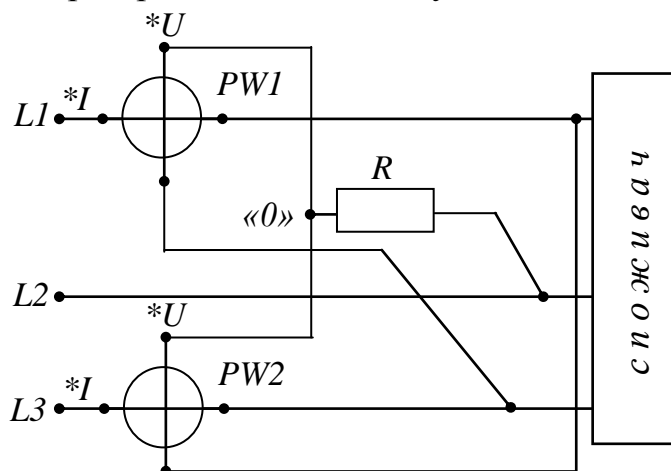


Рисунок 7.24 – Схема вимірювання реактивної потужності за методом двох ватметрів, які увімкнені за схемою зі штучною нульовою точкою

Для утворення штучної нульової точки в схемі необхідно, щоб опір допоміжного резистора R дорівнював значенням опорів кіл напруги R_{UPW1} та R_{UPW2} двох ватметрів: $R = R_{UPW1} = R_{UPW2}$. Виміряне значення реактивної потужності усього трифазного кола дорівнює

$$Q_{\text{кола}} = (P_{PW1} + P_{PW2}) \cdot \sqrt{3}. \quad (7.38)$$

Слід відзначити, що при вимірюванні активної потужності за методом двох ватметрів (див. рисунок 7.21) у разі повної симетрії трифазного кола можна одночасно з активною потужністю визначити й реактивну потужність за формулою

$$Q_{\text{кола}} = (P_{PW2} - P_{PW1}) \cdot \sqrt{3}. \quad (7.39)$$

Якщо лінійні струми трифазного кола більші, ніж границі вимірювання ватметрів за струмом, то їх струмові кола вмикають через вимірювальні трансформатори струму, а якщо напруги перевищують 600 В, застосовують вимірювальні трансформатори струму та напруги.

Якщо $k_{UH1} = k_{UH2} = k_{UH}$ і $k_{IH1} = k_{IH2} = k_{IH}$, то виміряне значення реактивної потужності дорівнює

$$Q_{\text{кола}} = k_{IH} \cdot k_{UH} \cdot (P_{PW1} + P_{PW2}) \cdot \sqrt{3}. \quad (7.40)$$

7.4 Вимірювання електричної енергії. Схеми вимірювань

Лічильники електричної енергії до однофазних кіл підключають до споживача або безпосередньо або з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги. На рисунку 7.25 наведена схема безпосереднього під'єднання однофазного лічильника до споживача, на якій літерами Γ позначені генераторні клеми лічильника, а літерами H – клеми підключення навантаження. Дійсна витрата активної електричної енергії за поточний період ΔW визначається за формулою

$$\Delta W = W_{\text{кінець}} - W_{\text{початок}}, \quad (7.41)$$

де $W_{\text{кінець}}$, $W_{\text{початок}}$ – показання лічильника наприкінці та на початку поточного періоду відповідно, $\text{кВт}\cdot\text{год}$.

На рисунку 7.26 наведена схема під'єднання однофазного лічильника до споживача через вимірювальні трансформатори струму та напруги.

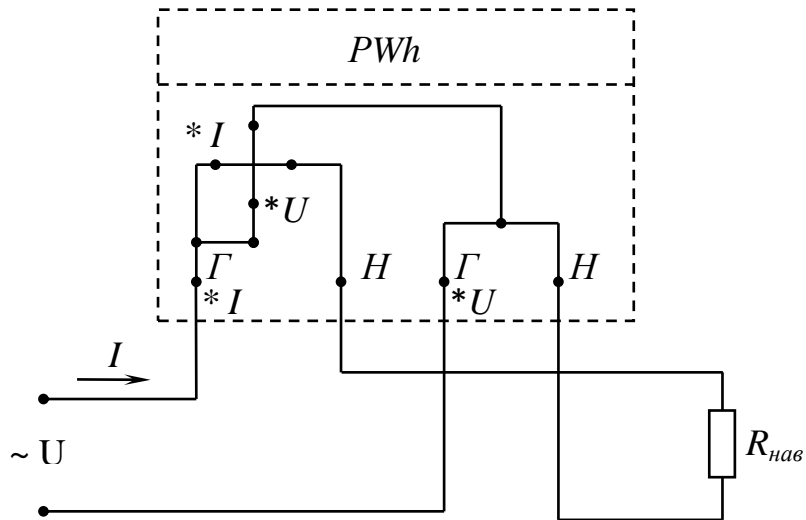


Рисунок 7.25 - Схема безпосереднього під'єднання однофазного лічильника до споживача

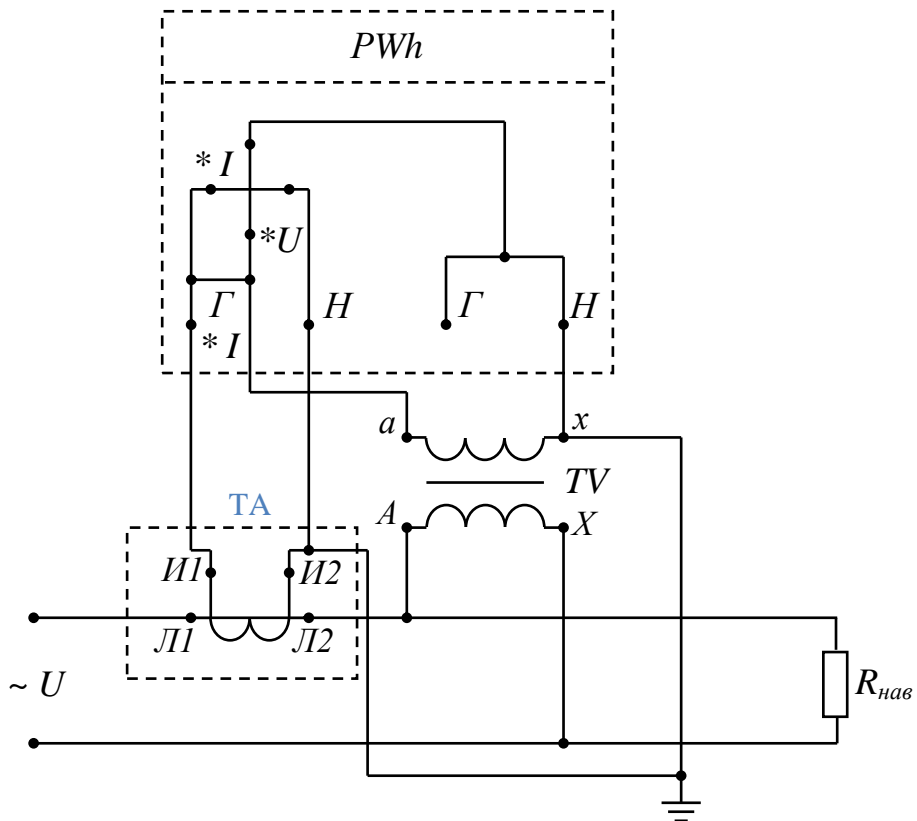


Рисунок 7.26 - Схема під'єднання однофазного лічильника до споживача через вимірювальні трансформатори струму та напруги

Дійсна витрата активної електричної енергії за поточний період ΔW визначається за формулою

$$\Delta W = k_{IH} \cdot k_{UH} \cdot (W_{\text{кінц}} - W_{\text{почат}}), \quad (7.42)$$

де $W_{кінц}$, $W_{почат}$ – показання наприкінці та на початку поточного періоду відповідно, $кВт \cdot год$.

На рисунку 7.27 наведена схема під'єднання трифазного індукційного лічильника через вимірювальні трансформатори струму та напруги.

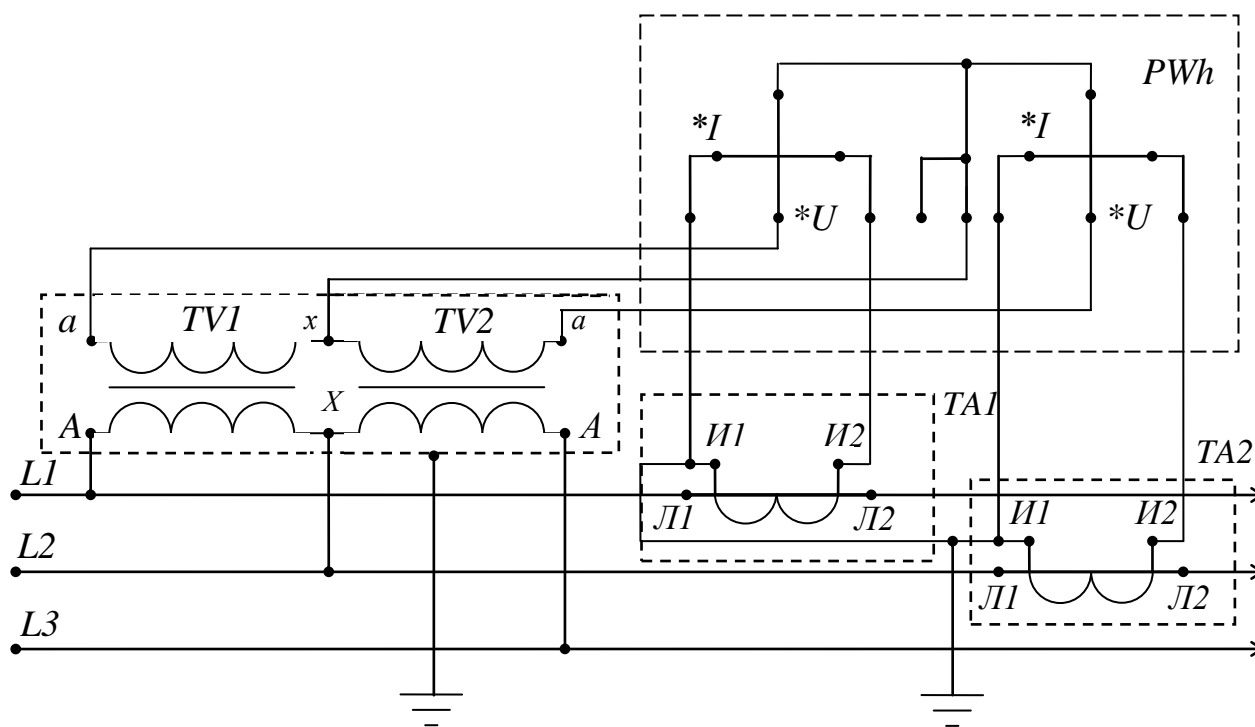


Рисунок 7.27 - Схема під'єднання трифазного індукційного лічильника через вимірювальні трансформатори струму та напруги

Одним із недоліків індукційних лічильників електричної енергії є невисока точність та вузький частотний діапазон (45...60 Гц).

Значно вищу точність мають електронні лічильники, в яких застосовують електронний інтегратор та спеціальні електронні вузли, які необхідні для одержання сигналу, пропорційного до спожитої енергії, з подальшим аналого-цифровим його перетворенням і цифровим відліком результату вимірювання. В електронних лічильниках вихідний сигнал у цифровому коді можна використовувати у схемах автоматизованого обліку електроенергії. Електронні лічильники використовують для вимірювання активної та реактивної потужностей в однофазних та трифазних колах змінного струму, а також для вимірювання, обліку активної та реактивної енергії при двох напрямках і при різних тарифах, для вимірювання частоти мережі, для вимірювання напруги та струму споживача, для вимірювання поточного часу при фіксованій календарній даті з наданням поточного тарифу на електричну енергію.

Електронні лічильники зберігають інформацію про загальну кількість спожитої електроенергії, про спожиту електроенергію за поточні і попередні роки та місяці. Основними блоками типового електронного лічильника є пер-

винний перетворювач потужності на напругу (ППН), перетворювач напруги на частоту (ПНЧ), інтегровальний пристрій (ІП) на базі мікроконтролера та цифровий відліковий пристрій (дисплей). На вхідні кола напруги та струму перетворювача потужності роздільно подається напруга споживача та струм. Вихідний код інтегровального пристрою пропорційний до спожитої енергії за відповідний проміжок часу. Результати вимірювання енергії надаються цифровим відліковим пристроєм, а також надходять в систему автоматизованого контролю і обліку електроенергії (АСКОЕ).

Контрольні запитання при вивченні теми 7 (частина 1)

- 1 Які засоби вимірювань використовуються при вимірюваннях постійного струму і напруги?
- 2 Які вимірювальні перетворювачі застосовуються для розширення діапазону вимірювання вольтметрів та амперметрів при вимірюваннях у колах постійного струму?
- 3 Які робочі засоби вимірювань використовуються при вимірюваннях змінних струмів і напруг? Які особливості при вимірюваннях змінних струмів та напруг?
- 4 Наведіть схеми вимірювання струму та напруг у колах постійного струму та у колах змінного струму.
- 5 Які види приладів застосовуються для вимірювання активної та реактивної потужності?
- 6 Як аналітично визначається активна потужність трифазного трипровідного кола при симетричному характері навантаження за методом одного ватметра?
- 7 Поясніть принцип включення ватметра для вимірювання реактивної потужності.
- 8 Як аналітично визначається реактивна потужність трифазного трипровідного кола при симетричному характері навантаження за методом одного ватметра?
- 9 Які методи необхідно обрати для вимірювання активної та реактивної потужності в трифазному трипровідному колі змінного струму при симетричному характері навантаження? Як аналітично визначаються активна та реактивна потужність трифазного трипровідного кола за вище обраним методом?
- 10 Як виміряти активну та реактивну потужності в трифазному чотирипровідному колі змінного струму при симетричному характері навантаження?
- 11 Поясніть від чого залежить кількість ватметрів при вимірюванні активної та реактивної потужності в трифазних колах змінного струму?

ТЕМА 7. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН (частина 2)

План лекції

7.5 Вимірювання коефіцієнта потужності. Схеми вимірювань

7.6 Вимірювання частоти. Схеми вимірювання

7.7 Вимірювання електричного опору в колах постійного струму.

Схеми вимірювання

7.8 Вимірювання параметрів елементів електричних кіл змінного струму

7.5 Вимірювання коефіцієнта потужності. Схеми вимірювань

Фазовий зсув вимірюють методами *безпосередньої оцінки* та *порівняння і опосередковано*, класифікація яких наведена на рисунку 7.1.

Вибір методу вимірювання залежить від частоти, рівня та форми сигналу, необхідної точності вимірювання і виду досліджуваного об'єкта.

Прямі вимірювання кута зсуву фаз або *метод безпосередньої оцінки* реалізують за допомогою спеціальних приладів – *фазометрів*, до яких належать:

- аналогові електромеханічні однофазні та трифазних фазометри;
- аналогові електронні фазометри;
- цифрові фазометри.

Всі фазометри градуйовані у кутових градусах або в радіанах.

Аналогові електромеханічні фазометри, побудовані на основі логометричних механізмів електродинамічної та електромагнітної систем, застосовують для вимірювання кута зсуву фаз між струмом та напругою однофазних та трифазних споживачів у частотному діапазоні $20 \dots 10000$ Гц при високих рівнях сигналу ($U \leq 600$ В) і невисокій точності вимірювання (класи точності 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0). Недоліком таких приладів є велике власне споживання потужності.

Електронні аналогові та цифрові фазометри застосовують для вимірювання кута зсуву фаз між двома гармонічними сигналами (напругами та струмами) у діапазоні частот 1 Гц... 10 МГц при низьких рівнях сигналів і високій точності вимірювань (похибка вимірювання $\delta_{\varphi} \geq \pm 0,1$ %).

Метод порівняння реалізують за допомогою електронного осцилографа і використовують для вимірювання кута зсуву фаз між двома сигналами однакової частоти у широкому діапазоні частот, який визначається смугою пропускання осцилографа (10 Гц... 20 МГц), і при невисокій точності вимірювань.

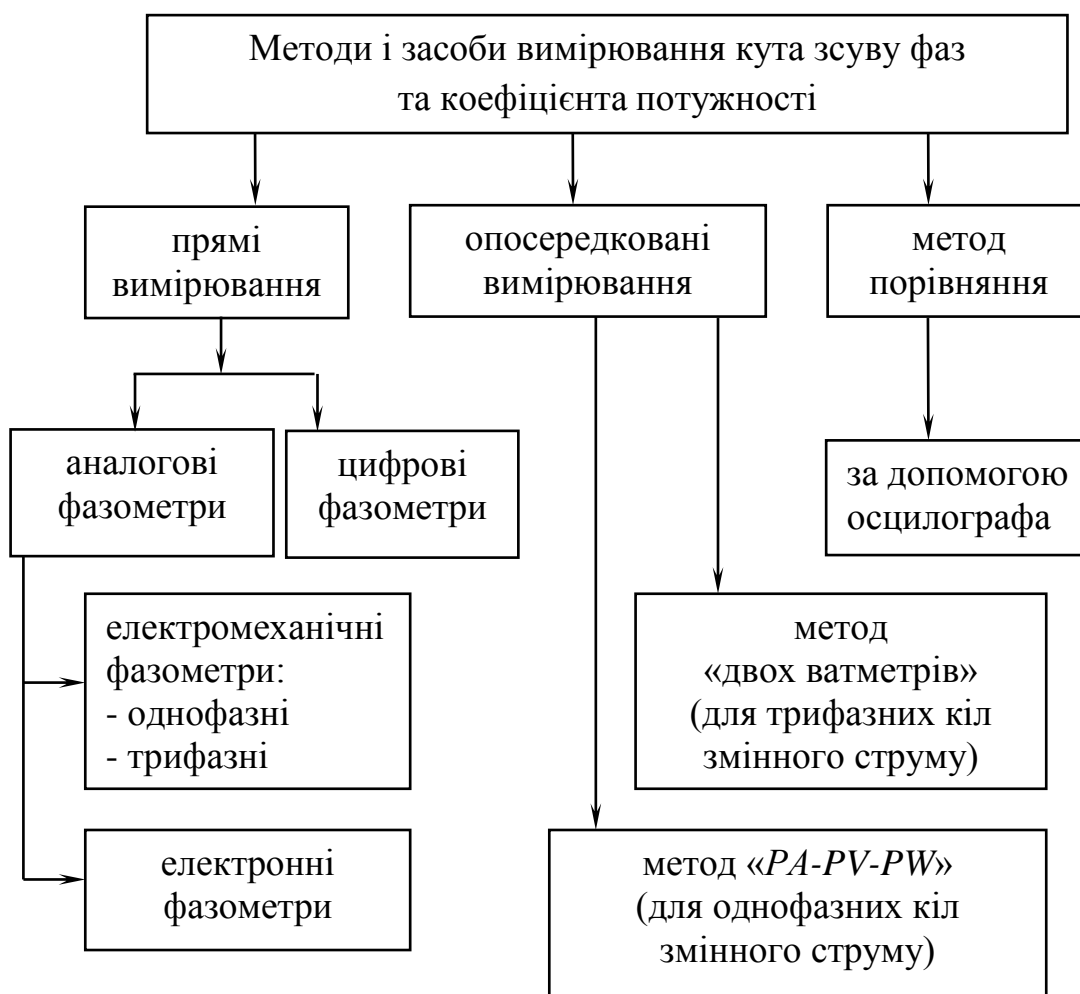


Рисунок 7.1 – Класифікація методів і засобів вимірювання кута зсуву фаз та коефіцієнта потужності

Відношення активної потужності P споживача до повної потужності S , яке дорівнює косинусу кута зсуву фаз φ між струмом I та напругою U у цьому споживачі, має назву коефіцієнт потужності

$$k_{\varphi} = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi}{U \cdot I}, \quad (7.1)$$

де U та I – середньоквадратичні (діючі) значення напруги та струму.

Слід відзначити, що значення фазового зсуву φ і коефіцієнта потужності $k_{\varphi} = \cos \varphi$ є однозначно визначеними тільки для однофазних і повністю симетричних трифазних кіл змінного струму.

Прилад прямої дії – *фазометр* здатен одночасно вимірювати як значення кута зсуву φ , так й значення коефіцієнта потужності $k_{\varphi} = \cos \varphi$, шкала такого приладу градуйована як в кутових одиницях (від -90° до $+90^{\circ}$), так й в одиницях коефіцієнта потужності (від мінус 1 до плюс 1).

Крім методу безпосередньої оцінки та методу порівняння кут зсуву фаз між напругою та струмом однофазного споживача можна визначати *опосередковано* за допомогою трьох приладів – амперметра, вольтметра, ватметра

$$\varphi = \arccos \frac{P_{PW}}{U_{PV} \cdot I_{PA}}. \quad (7.2)$$

У симетричному трипровідному трифазному колі значення кута зсуву фаз φ та коефіцієнта потужності k_φ можна встановити за показами P_{PW1} та P_{PW2} двох ватметрів, які увімкнені за схемою, що наведена на рисунку 2.6 в розділі 2, відповідно до формули (2.9). За такою схемою вимірюється як активна, так й реактивна потужності, а кут зсуву фаз φ визначається за формулою

$$\varphi = \arctg \sqrt{3} \cdot \frac{P_{PW2} - P_{PW1}}{P_{PW1} + P_{PW2}}. \quad (7.3)$$

Слід відзначити, що значення коефіцієнта потужності, розраховане за вище наведеними методами, є *миттєвим* – для моменту часу, коли здійснювалось вимірювання.

Для контролю та аналізу роботи промислових енергосистем в умовах зміни навантаження характерним є *середнє значення коефіцієнта потужності* $k_{\varphi, \text{сеп}}$ за певний проміжок часу за показами лічильників активної W_a та реактивної W_p енергії

$$k_{\varphi, \text{сеп}} = \cos \varphi_{\text{сеп}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_p}{W_a}\right)^2}}. \quad (7.4)$$

Розглянемо аналогові електромеханічні фазометри більш детально.

Схема електродинамічного фазометра на основі логометричного механізму наведена на рисунку 7.2.

В основі приладу – електродинамічний логометр, рухомі рамки 2 та 3 якого скріплені під кутом 60° . В рамці 2 струм I_2 збігається за фазою з напругою на навантаженні U .

В електродинамічному фазометрі кут повороту рухомої частин α не залежить від струму та напруги, шкала приладу є рівномірною з нульовою позначкою посередині шкали, при цьому кут α є лінійною функцією відношення проєкцій векторів струмів в рухомих котушках на вектор струму в нерухомій котушці згідно функції перетворення

$$\alpha = f \left(\frac{I_3 \cos(\beta - \varphi)}{I_2 \cos \varphi} \right). \quad (7.5)$$

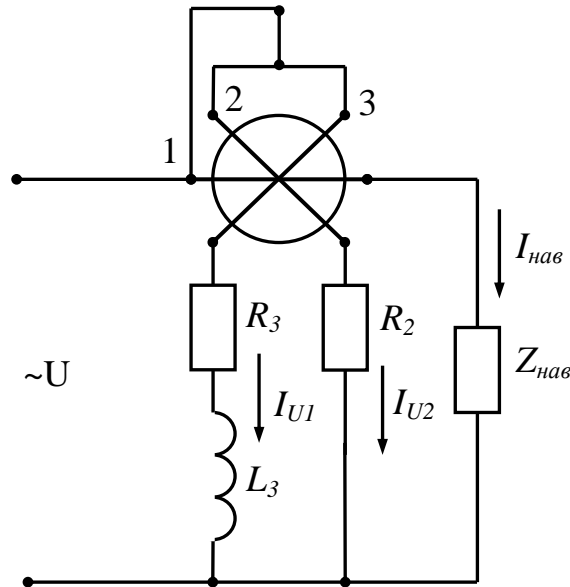


Рисунок 7.2 – Схема електродинамічного фазометра

На основі електродинамічних механізмів базуються фазометри для вимірювань коефіцієнту потужності у трифазних симетричних колах змінного струму. На рисунку 7.3 наведена схема увімкнення трифазного одноелементного електродинамічного фазометра до трифазного кола змінного струму. Секції нерухомої частини вимірювального механізму увімкнені послідовно в коло струму фази A , а секції рухомої частини через резистори R_1 та R_2 увімкнені на лінійні напруги U_{AC} та U_{AB} . Таким чином, на секції рухомої частини вимірювального механізму діють два обертальні моменти

$$M_{об.1} = k_1 \cdot I_A \cdot \frac{U_{AC}}{R_2} \sin \alpha \cdot \cos \left(U_{AC} \hat{I}_A \right); \quad (7.6)$$

$$M_{об.2} = k_2 \cdot I_A \cdot \frac{U_{AB}}{R_1} \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos \left(U_{AB} \hat{I}_A \right), \quad (7.7)$$

де I_A , U_{AB} , U_{AC} – середньоквадратичні (діючі) значення фазового струму фази A та відповідних лінійних напруг;

α – кут повороту рухомої частини;

β – просторовий кут між площинами секцій рухомої частини.

У момент рівноваги $M_{об1} = M_{об2}$, та за умови повної симетрії трифазного кола (кут $\beta = \frac{2 \cdot \pi}{3}$) отримуємо рівняння шкали фазометра

$$\alpha = \frac{\pi}{3} + \varphi, \quad (7.8)$$

тобто між кутом повороту α рухомої частини вимірювального механізму і вимірюваним кутом зсуву фаз φ між фазними струмами і напругами трифазного споживача є лінійна залежність і шкала фазометра є лінійною (рівномірною).

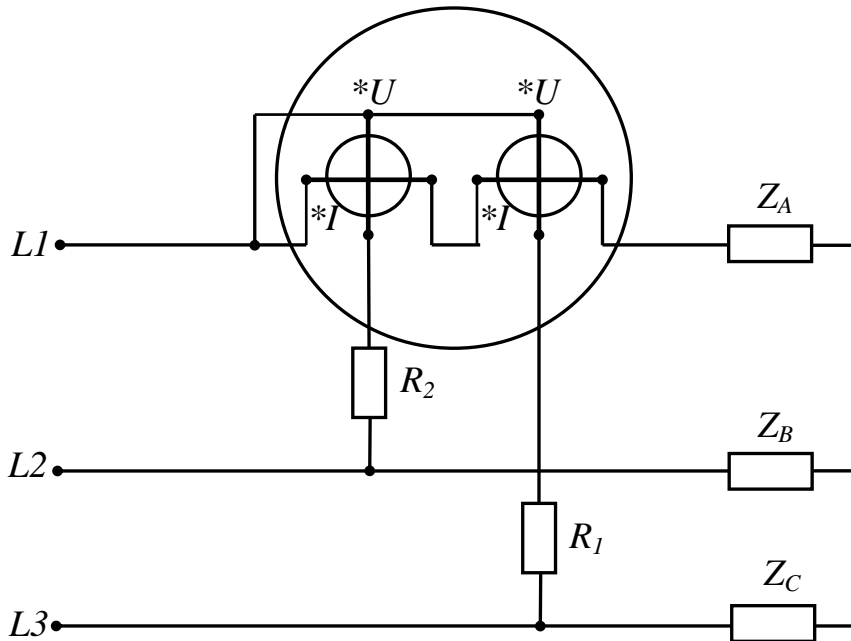


Рисунок 7.3 - Схема увімкнення трифазного одноелементного електродинамічного фазометра до трифазного кола змінного струму

Трифазні електромагнітні фазометри використовуються для вимірювання коефіцієнта потужності в трифазних електромережах при симетричному навантаженні. Прилади вмикаються до трифазного кола безпосередньо та через вимірювальний трансформатор струму.

На рисунку 7.4 наведена схема увімкнення трифазного електромагнітного фазометра до трифазного кола змінного струму. В конструкції приладу є три нерухомі котушки, які на рисунку позначені цифрами 1, 2, 3. Котушки 1 та 2 є котушками струму та виконані двохсекційними, а між ними розміщена рухома частина приладу у вигляді осердя, який за формою нагадує літеру Z, який обертається на осі та зв'язаний зі стрілочним покажчиком. Секції котушок мають просторове розташування відносно одна одної під кутом 60° . У коло котушки 3 (котушка напруги) увімкнений додатковий резистор R . Котушка напруги 3 створює магнітне поле, яке пульсує, лінії якого замикаються через осердя. Котушки струму 1 та 2 створюють магнітне поле, яке обертається.

Під впливом такого магнітного поля осердя займає положення, при якому енергія магнітного поля буде максимальною. Це відповідає положенню осердя у напрямку вектора магнітної індукції магнітного поля, яке обертається, в момент максимуму індукції поля, що пульсує. Різним фазним кутам зсуву струму відносно напруги відповідають просторові положення осі поля, що обертається,

в момент максимуму поля, різними є й положення осердя. За значенням кута повороту рухомої частини визначають фазний кут зсуву у колі трифазного кола.

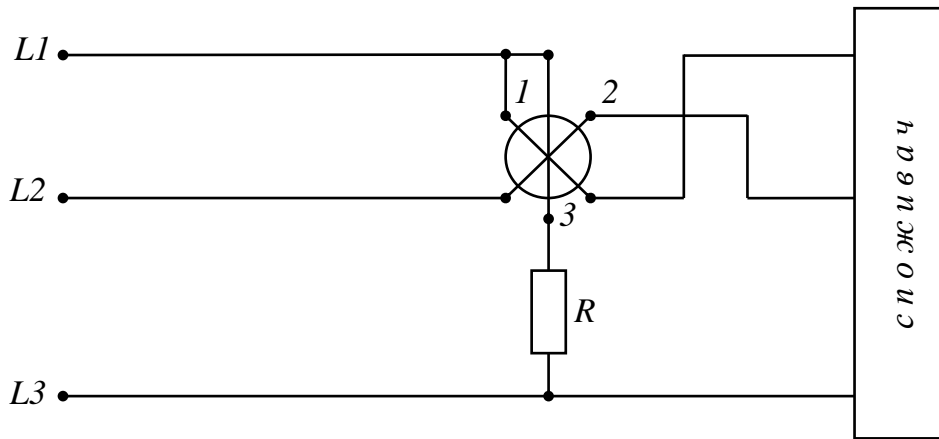


Рисунок 7.4 - Схема увімкнення трифазного електромагнітного фазометра до трифазного кола змінного струму

Розглянемо *аналогові електронні фазометри*, які застосовують для вимірювання кута зсуву фаз між двома напругами $u_1(t) = U_{m1} \sin \omega t$ та $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi)$, тому то вони є двоканальними.

На рисунку 7.5 наведена структурна схема аналогового електронного фазометра, основою роботи якого є принцип перетворення кута зсуву фаз між напругами $u_1(t)$ та $u_2(t)$ в прямокутні імпульси струму. Напруги, що досліджуються, $u_1(t)$ та $u_2(t)$ однакової частоти, зміщені за фазою на кут φ , надходять на два ідентичні канали, кожен з яких складається з вхідного підсилювача – обмежувача та формувача прямокутних імпульсів. На виходах формувачів строюються прямокутні імпульси $U_{П1}$ та $U_{П2}$ однакової амплітуди U_m і тривалості $T/2$, зміщені у часі на проміжок Δt , який пропорційний до вимірюваного кута зсуву фаз φ . Прямокутні імпульси $U_{П1}$ та $U_{П2}$ своїми передніми та задніми фронтами керують роботою формувача прямокутних імпульсів – тригера 3, на виході якого створюється послідовність імпульсів струму $I_{П3}$ з амплітудою I_m , тривалістю Δt і періодом $T/2$.

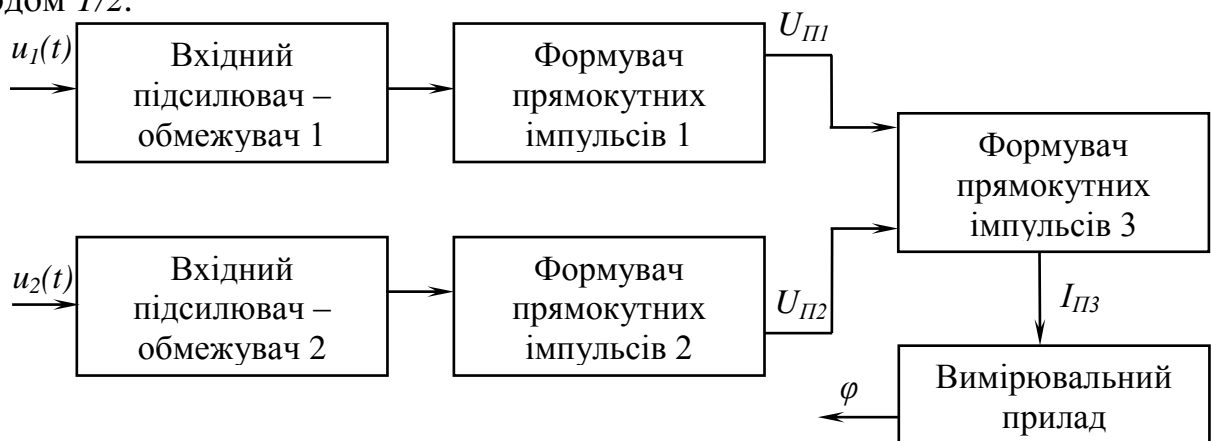


Рисунок 7.5 - Структурна схема аналогового електронного фазометра

У вихідне коло формувача 3 увімкнений аналоговий вимірювальний прилад – магнітоелектричний міліамперметр, покази якого пропорційні до середнього значення струму I_0 за період T

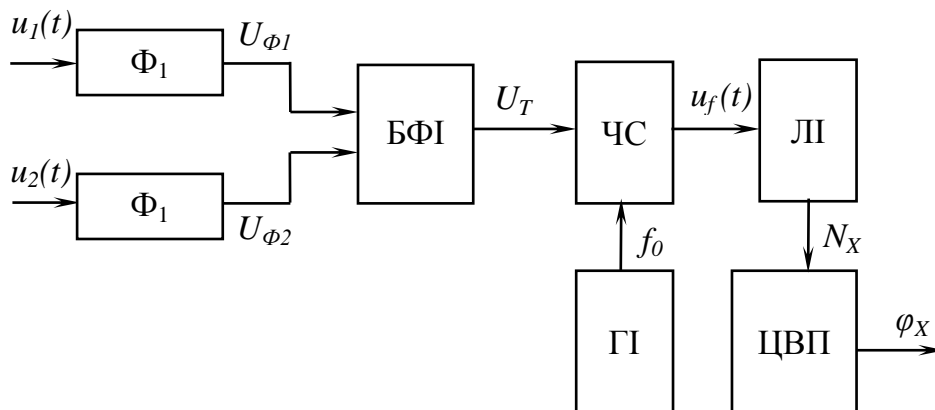
$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T I_{ПЗ} dt = \frac{2 \cdot \Delta t}{T} \cdot I_m. \quad (7.9)$$

Так як, $\varphi = \omega \cdot \Delta t$ і $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$, то отримуємо вираз, який пов'язує вимірюваний кут φ з середнім значенням струму I_0 , тобто з показом міліамперметром

$$\varphi = 360 \cdot \frac{\Delta t}{T} = \frac{180}{I_m} \cdot I_0 = k \cdot I_0. \quad (7.10)$$

Тому то шкала міліамперметра, що градуйована безпосередньо в градусах, є лінійною і залежить від частоти та рівнів сигналів, кут зсуву фаз між якими вимірюється. Слід відзначити, що перевагами аналогових електронних приладів порівняно з електромеханічними є широкий частотний діапазон (1 Гц...10 МГц), широкий рівень вхідних сигналів (0,01...200 В), а також можливість вимірювання кута зсуву фаз між двома сигналами.

Істотними перевагами цифрових вимірювальних приладів над аналоговими є висока точність, широкий діапазон вимірювання, можливість безпосереднього використання результатів вимірювання для керування технологічними процесами призвели до появи *цифрових фазометрів*. Це прилади, які призначені для вимірювання кута зсуву фаз між двома синусоїдними напругами однакової частоти. На рисунку 7.6 наведена структурна схема цифрового фазометра, призначення якого – це вимірювання миттєвого значення фазового зсуву φ_X між сигналами $u_1(t)$ та $u_2(t)$.



Φ_1, Φ_2 – формувачі прямокутних імпульсів; БФІ – блок формування імпульсу; ЧС – часовий селектор; ЛІ – лічильник імпульсів; ГІ – генератора лічильних імпульсів; ЦВП – цифровий відліковий пристрій

Рисунок 7.6 – Структурна схема цифрового фазометра

В момент переходу кривих $u_1(t)$ та $u_2(t)$ через нуль формувачі Φ_1 та Φ_2 формують короткі прямокутні імпульси $U_{\Phi 1}$ і $U_{\Phi 2}$, які відкривають і закривають блок формування імпульсів $БФІ$. Часовий селектор $ЧС$ упродовж часу t_X пропускає лічильні імпульси частотою f_0 від генератора імпульсів $ГІ$ на лічильник імпульсів $ЛІ$ та цифровий відліковий пристрій $ЦВП$. Кількість імпульсів N_X , що надійшли на лічильник, дорівнює

$$N_X = \frac{t_X}{T_0} = t_X \cdot f_0. \quad (7.11)$$

Так як фазовий зсув φ_X гармонічних коливань визначається як

$$\varphi_X = \frac{2 \cdot \pi \cdot t_X}{T_X}, \quad (7.12)$$

де T_X - період коливань; $T_X = 1/f_X$;

t_X - часовий зсув між коливаннями $u_1(t)$ та $u_2(t)$, тоді з врахуванням формули (7.12)

$$\varphi_X = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_X \cdot N_X}{f_0} = k_\varphi \cdot N_X, \quad (7.13)$$

де k_φ - коефіцієнт перетворення фазометра.

Так як за формулою (7.13) для визначення φ_X необхідно знати значення частоти f_X , тому то в одному приладі суміщають функції частотоміра та фазометра: спочатку виконується цикл вимірювання періоду сигналу T_X і визначення частоти f_X , а потім виконується цикл вимірювання зсуву фаз φ_X .

У сучасних цифрових фазометрах результат вимірювання подається безпосередньо в електричних градусах з урахуванням знака фазового кута, а границі допустимої основної похибки, яка також виражена в електричних градусах, визначають за одночленною або двочленною формулами

$$\Delta_{\varphi, \text{сп}} = \pm a^0; \quad \Delta_{\varphi, \text{сп}} = \pm (a + b\varphi_X)^0. \quad (7.14)$$

Наприклад, границя допустимої основної похибки фазометра Ф2-16 дорівнює $\pm (0,2 + 0,004 \cdot \varphi_X)^0$, а для фазометра Ф5126 границя допустимої основної похибки фазометра дорівнює $\pm 0,3^0$.

7.6 Вимірювання частоти. Схеми вимірювання

Частоту вимірюють спеціальними приладами – *частотомірами*, на основі метода безпосередньої оцінки і методами порівняння, класифікація яких наведена на рисунку 7.7. Методи безпосередньої оцінки реалізують за допомогою аналогових електромеханічних і електронних та цифрових частотомірів.

Аналогові електромеханічні частотоміри електромагнітної, електродинамічної та феродинамічної систем застосовують для вимірювання частоти у промислових умовах в діапазоні 20...2500 Гц з невисокою точністю (класи точності приладів 0,2; 0,5; 1,5; 2,5).

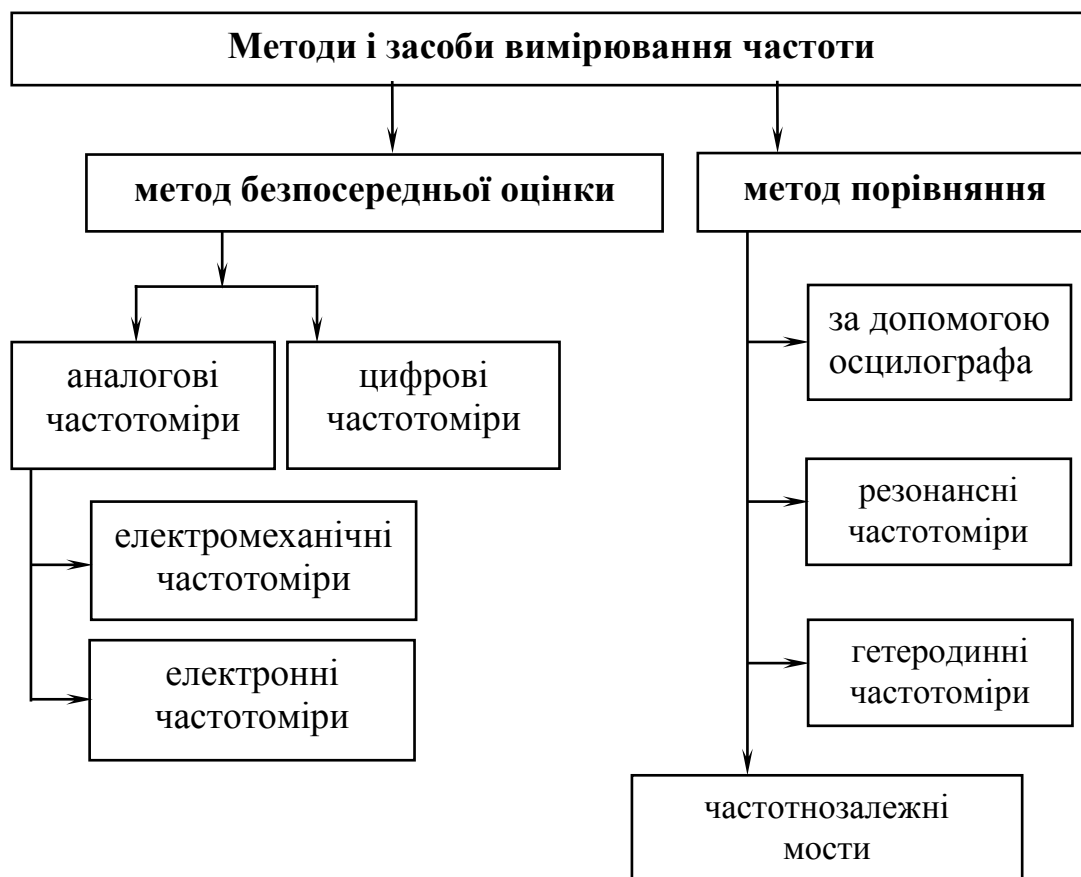


Рисунок 7.7 – Класифікація методів і засобів вимірювання частоти

Недоліком електромеханічних частотомірів є велике власне споживання потужності і залежність показів від впливу зовнішніх факторів, наприклад, вібрацій.

Аналогові електронні (конденсаторні) частотоміри використовують для вимірювання частоти періодичних сигналів у діапазоні 10 Гц...500 кГц при регулюванні електро- та радіовимірювальної апаратури, класи точності таких приладів 0,2; 0,5; 1,0; 1,5.

Цифрові частотоміри призначені для високоточних вимірювань частоти гармонічних та імпульсних періодичних сигналів у діапазоні 10 Гц...10 ГГц, а також для вимірювання відношення частот двох сигналів, періоду та часових інтервалів у діапазоні 10^{-9} ... 10^5 с. Мінімально можливе значення похибки частоти та часових інтервалів становить $\pm 10^{-7}$ %.

Вимірювання частоти методом порівняння полягає у порівнянні вимірюваної частоти f_X з точно відомою частотою f_N , а рівність частот $f_X = f_N$ або крат-

ність частот f_X/f_N визначають індикаторами рівноваги – електронними осцилографами, частотнозалежними мостами і резонансними частотомірами.

Осцилографічний метод застосовують для вимірювання частоти неперервних та імпульсних періодичних сигналів у діапазоні $10 \text{ Гц} \dots 20 \text{ МГц}$, який визначається смугою пропускання електронно-променевої трубки.

Частотнозалежні мости змінного струму забезпечують вимірювання частоти в звуковому діапазоні від 20 Гц до 20 кГц .

Гетеродинні та резонансні частотоміри використовують для вимірювання частоти неперервних, амплітудно-модульованих та імпульсно-модульованих сигналів у діапазоні $50 \text{ кГц} \dots 20 \text{ ГГц}$ у галузі радіотехнічних вимірювань.

Розглянемо аналогові електромеханічні частотоміри більш детально. Основою конструкції таких частотомірів є логометричні механізми електродинамічної, феродинамічної та електромагнітної систем, вітки яких містять два частотнозалежні кола з різною функціональною залежністю їх параметрів від частоти. На рисунку 7.8 наведена схема електродинамічного частотоміра, а на рисунку 7.9 – схема електромагнітного частотоміра.

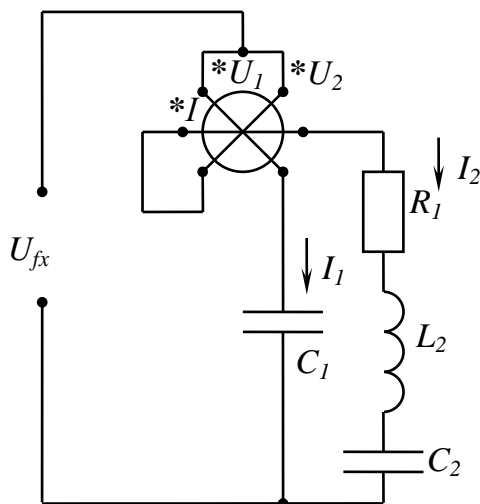


Рисунок 7.8 – Схема електродинамічного частотоміра

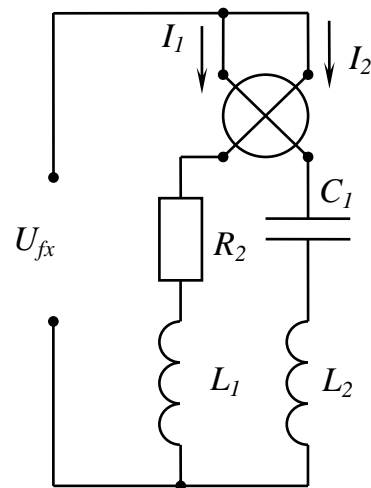


Рисунок 7.9 – Схема електромагнітного частотоміра

Принцип дії *електродинамічного частотоміра* оснований на залежності кута зсуву фаз струму I_1 щодо напруги U_{fX} від частоти сигналу f_X . Параметри елементів R_1 , L_1 і C_1 підібрані так, що частота резонансу напруг послідовного контуру дорівнює середній частоті діапазону вимірювання

$$f_{рез} = f_{сер} = (f_{поч} + f_{кінь}) \cdot 0,5, \quad (7.15)$$

де $f_{поч}$, $f_{кінь}$ – початкове і кінцеве значення діапазону вимірювання частоти.

У момент резонансу струм I_1 збігається з напругою U_{f_x} , зсув фаз між струмами I_1 та I_2 у рамках логометра дорівнює 90° , внаслідок чого показчик приладу встановиться посередині шкали. При відхиленні частоти f_x від $f_{сер}$ буде змінюватися кут φ між струмом I_1 та напругою U_{f_x} і відповідно, показ приладу. Шкала приладу проградуєвана в $Гц$.

У схемі електромагнітного частотоміра значення струмів I_1 та I_2 в колах логометра по-різному залежать від частоти f_x . Параметри кіл логометра підібрані так, що на середній частоті $f_x = f_{сер}$ діапазону вимірювання $f_{почат} \dots f_{кінц}$ струми I_1 та I_2 дорівнюють один одному і вказівник приладу займає положення посередині шкали. Виміряним значенням частоти f_x відповідають відповідні кути відхилення рухомої частини приладу в залежності від значення струмів I_1 та I_2 .

Електродинамічні та електромагнітні частотоміри мають вузький діапазон вимірювання, наприклад, $45 \dots 55 Гц$, невисокі класи точності – 0,5; 1,0; 1,5; 2,5, і велике власне споживання потужності – $10 Вт$, але завдяки простоті конструкції і високій надійності такі прилади широке застосування в енергетичних системах для вимірювання промислової частоти.

Границя основної похибки аналогових частотомірів виражена у формі зведеної похибки, яка чисельно дорівнює класу точності

$$\gamma_{PHz.zp} = \pm \frac{\Delta_{PHz.zp}}{f_N} \cdot 100\%, \quad (7.16)$$

де $\Delta_{PHz.zp}$ – границя основної абсолютної похибки частотоміра, $Гц$;

f_N – нормувальне значення, $Гц$.

Частотоміри належать до одного із класів точності: 0,02; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5, а нормувальне значення f_N дорівнює верхній границі діапазону вимірювання $f_{кінц}$.

Принцип дії *цифрового частотоміра*, структурна схема якого наведена на рисунку 7.10, оснований на підрахуванні кількості періодів T_x невідомої частоти f_x за відомий інтервал часу T_B . Сигнал U_{f_x} невідомої частоти f_x через вхідний блок *ВБ* надходить на формувач Φ , який перетворює його в послідовність імпульсів з періодом T_x .

Для формування часового інтервалу T_B використовується кварцовий генератор імпульсів *ГІ*, подільник частоти *ПЧ* та блок формування імпульсів *БФІ*, на виході якого формується прямокутний імпульс.

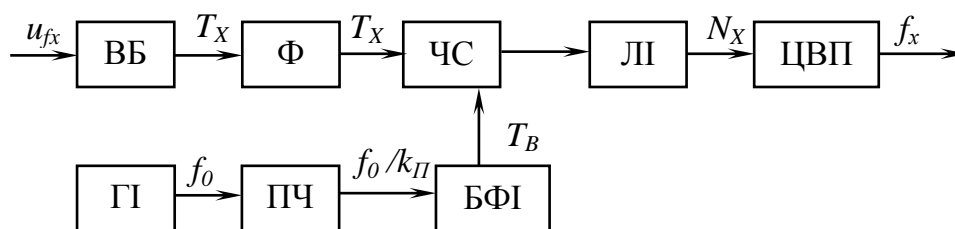


Рисунок 7.10 - Структурна схема цифрового частотоміра

Тривалість прямокутного імпульсу з блоку формування імпульсів *БФІ* дорівнює

$$T_B = \frac{1}{f_0} = \frac{k_{\Pi}}{f_0}, \quad (7.17)$$

де f_0 – коефіцієнт поділу частоти подільника напруги *ПЧ*.

Часовий селектор *ЧС* (ключ) упродовж часу T_B пропускає імпульси частотою f_X лічильник імпульсів *ЛІ* і цифровий відліковий пристрій *ЦВП*. Кількість імпульсів N_X , що надійшли на лічильник, дорівнює

$$N_B = \frac{T_B}{T_X} = T_B \cdot f_X. \quad (7.18)$$

Вимірювана частота f_X визначається

$$f_X = \frac{N_X}{T_B}. \quad (7.19)$$

Граничне значення відносної похибки вимірювання частоти знаходять за формулою

$$\delta_{f_X} = \pm(\delta_{f_0} + \delta_{KB}) \cdot 100\%, \quad (7.20)$$

де δ_{f_0} – відносна похибка нестабільності частоти f_0 генератора лічильних імпульсів;

δ_{KB} – відносна похибка квантування, яка визначається за виразом

$$\delta_{KB} = \pm \frac{1}{N_X} = \pm \frac{1}{f_X \cdot T_B}. \quad (7.21)$$

Принцип дії цифрового частотоміра у режимі «вимірювання періоду», структурна схема якого наведена на рисунку 7.11, оснований на підрахунку кількості періодів відомої частоти f_0 за інтервал часу, який дорівнює вимірюваному періоду T_X .

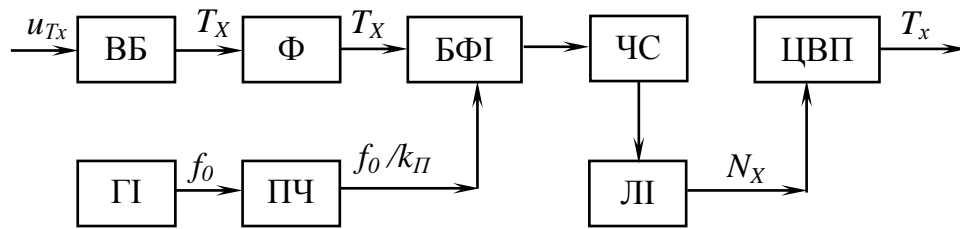


Рисунок 7.11 - Структурна схема цифрового частотоміра у режимі «вимірювання періоду»

Кількість імпульсів N_x , що надійшли на лічильник $ЛІ$, пропорційна до вимірюваного періоду T_x

$$N_x = T_x \cdot \frac{f_0}{k_{П}} = \frac{T_x \cdot f_0}{k_{П}}. \quad (7.22)$$

Для підвищення точності вимірювання періоду кількість лічильних імпульсів N_x підраховують не за один період T_x , а за декілька, тобто здійснюється розширення часу вимірювання за допомогою подільника частоти вхідного сигналу. Значення вимірюваного періоду T_x визначається за формулою

$$T_x = \frac{N_x \cdot k_{П}}{n \cdot f_0}, \quad (7.23)$$

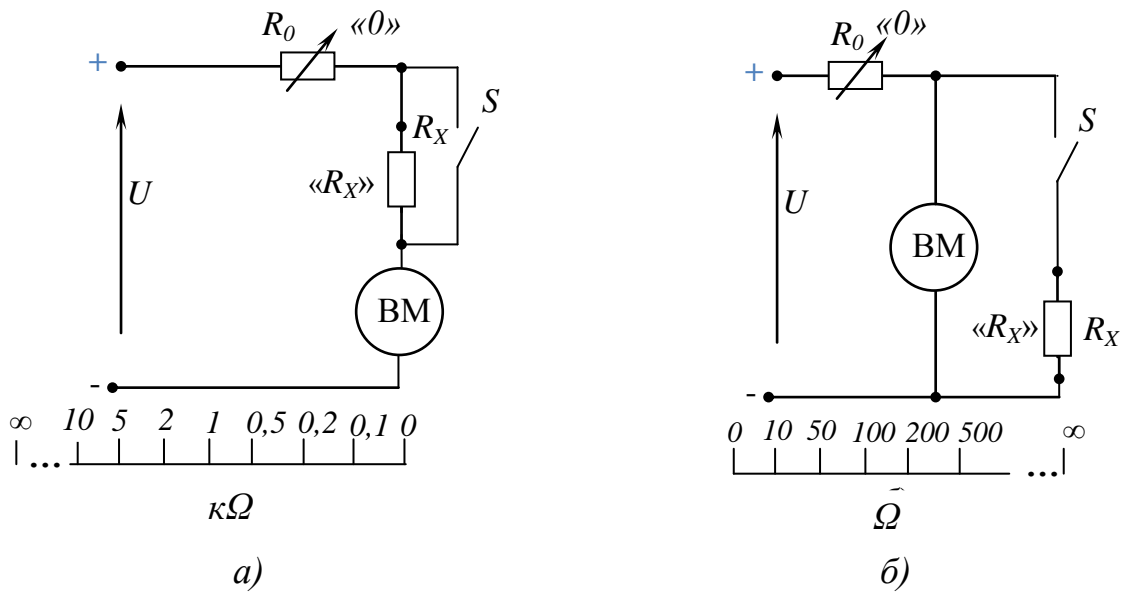
де n – коефіцієнт розширення, який дорівнює кількості вимірюваних періодів T_x , що становить час вимірювання.

Сучасні цифрові частотоміри – це багатофункціональні прилади, які містять мікропроцесор, призначення якого це обробка сигналів калібрування, керування усім частотоміром. Такі частотоміри вимірюють частоту від сотих частот $Гц$ до сотень $МГц$, інтервали часу, періодів та відношення частот. Швидкодія лічильників імпульсів дає змогу вимірювати частоту до $1 Гц$ з відносною похибкою $\pm 10^{-7} \%$.

7.7 Вимірювання електричного опору в колах постійного струму.

Схеми вимірювання

Омметри з магнітоелектричними вимірювальними механізмами будують за двома схемами: з послідовним і паралельним увімкненням вимірюваного опору R_x . На рисунку 7.12.а наведена схема магнітоелектричного омметра з послідовним увімкненням вимірювального опору R_x і вимірювального механізму $ВМ$. На рисунку 7.12.б наведена схема магнітоелектричного омметра з паралельним увімкненням вимірювального опору R_x і вимірювального механізму $ВМ$.



а - з послідовним увімкненням; б - паралельним увімкненням
Рисунок 7.12 - Схема магнітоелектричного омметра

У схемі з послідовним увімкненням вимірюваного опору R_X та вимірювального механізму BM магнітоелектричної системи струм вимірювального механізму I_{BM} дорівнює

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM} + R_X}, \quad (7.24)$$

- якщо $R_X = 0$, то

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM}} = I_{max}; \quad (7.25)$$

- якщо $R_X = \infty$, то $I_{BM} = 0$,

де U – напруга джерела живлення;

R_0 – опір резистора регулювання.

Опір резистора регулювання R_0 призначений для встановлення нульового показу омметра («0») при закорочених за допомогою перемикача S вхідних застискачах « R_X ». *Висновок:* якщо $U = const$, струм I_{BM} є функцією R_X , шкала омметра *обернена та істотно нелінійна (нерівномірна)*, максимальна чутливість схеми настає за умовою $R_X \gg R_{BM}$. Схема застосовується для вимірювання великих опорів – для мегаомметрів.

У схемі з паралельним увімкненням вимірюваного опору R_X та вимірювального механізму BM магнітоелектричної системи струм вимірювального механізму I_{BM} дорівнює

$$I_{BM} = \frac{U}{\frac{R_0 \cdot R_{BM}}{R_X} + R_0 + R_{BM}}, \quad (7.26)$$

- якщо $R_X = 0$, то $I_{BM} = 0$;

- якщо $R_X = \infty$, то

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM}} = I_{max}. \quad (7.27)$$

Висновок: якщо $U = const$, струм I_{BM} також є функцією R_X , а шкала омметра *пряма та істотно нелінійна (нерівномірна)*, максимальна чутливість схеми настає за умовою $R_X \ll R_{BM}$. Схема застосовується для вимірювання малих опорів – для *міліомметрів та омметрів*.

Основним недоліком схем омметрів з магнітоелектричним вимірювальним механізмом є залежність їх показів від стабільності напруги джерела живлення.

Слід відзначити, що такого недоліку немає в омметрах з логометричним вимірювальним механізмом, схема якого наведена на рисунку 7.13.

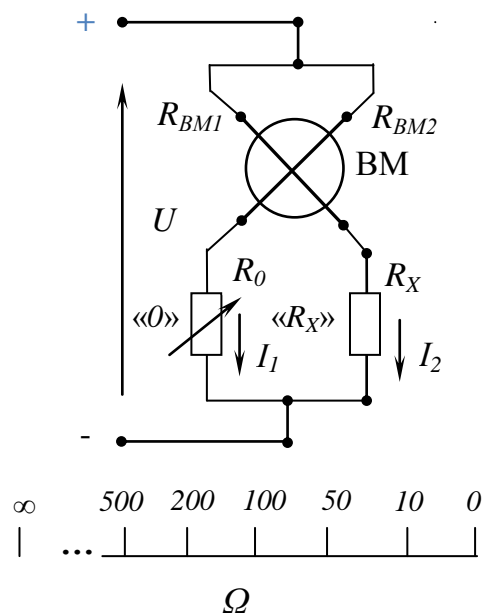


Рисунок 7.13 – Схема омметра з логометричним вимірювальним механізмом

Вимірюваний опір R_X з'єднаний послідовно з однією із котушок R_{BM1} логометра. Струми у колах котушок логометра дорівнюють

$$I_1 = \frac{U}{R_X + R_{BM1}}; \quad I_2 = \frac{U}{R_0 + R_{BM2}}. \quad (7.28)$$

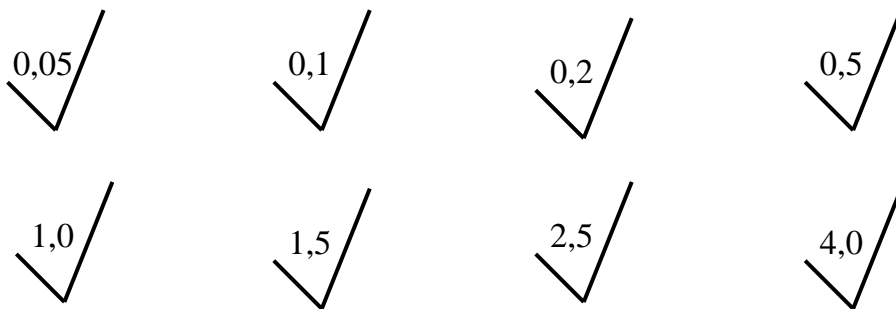
Рівняння шкали омметра має вигляд

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_{BM2} + R_0}{R_{BM1} + R_X}\right) = f(R_X). \quad (7.29)$$

Покази омметра з логометричною схемою не залежать від напруги джерела живлення, однак шкала *обернена* і також є *істотно нелінійною*.

Омметрам присвоюють такі класи точності:

- для омметрів з рівномірною шкалою $c = 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0$;
- для омметрів з нерівномірною шкалою клас точності позначається відповідно



Розглянемо вимірювання електричного опору цифровими омметрами. Цифрові омметри є складовою частиною комбінованих цифрових вимірювальних приладів - *мультиметрів*, які призначені для вимірювань постійного струму і напруги, змінного струму і напруги та електричного опору. Цифрові омметри випускаються як автономні прилади, конструкція яких – це мостові схеми постійного струму із автоматичним зрівноважуванням. Діапазон вимірювань опорів цифровими омметрами досить широкий: від 10^{-3} до 10^{12} Ом, але є вужчим, ніж у мостів постійного струму із ручним зрівноважуванням та аналогових електронних омметрів.

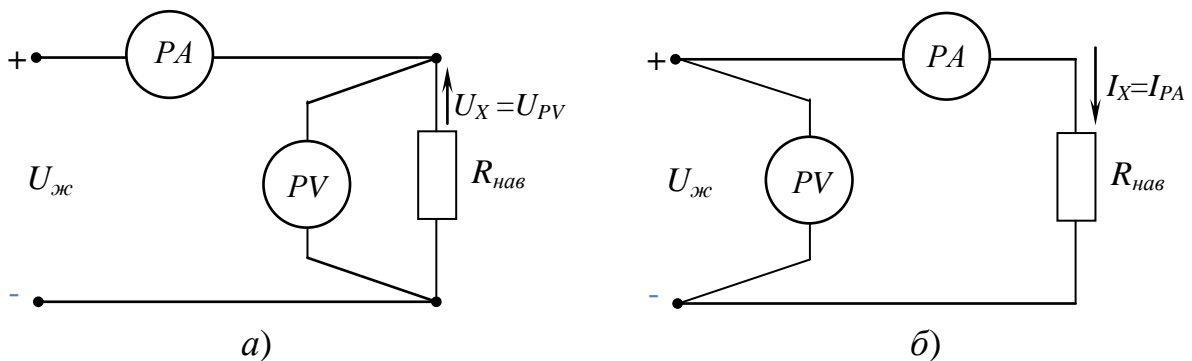
Цифровим омметрам властива висока точність вимірювання, так як відносна похибка вимірювання становить $\pm 0,005$ %. Слід відзначити й недоліки цифрових омметрів: необхідність пропускання через вимірюваний опір порівняно великого струму, що не дає змоги застосовувати цифрові омметри для метрологічної повірки малопотужних резистивних перетворювачів. Але такі переваги, як автоматизація вимірювання, одержання результату вимірювання у цифровому коді, висока точність вимірювань дозволили цифровим омметрам стати найперспективнішими засобами вимірювання електричного опору.

Метод вимірювання електричного опору за допомогою амперметра і вольтметра ґрунтується на використанні закону Ома для ділянки кола, згідно з яким опір об'єкту визначається за формулою

$$R_X = \frac{U_{PV}}{I_{PA}}. \quad (7.30)$$

Використання двох приладів й дало методу таку назву. Метод є незамінним під час вимірювання опорів резисторів, обмоток електричних машин та об'єктів, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику.

Для вимірювання опору за допомогою амперметра і вольтметра застосовують дві схеми вмикання приладів, які наведені на рисунку 7.14.



- а - схема правильного вимірювання напруги;
 б - схема правильного вимірювання струму

Рисунок 7.14 - Схема вимірювання електричного опору методом амперметра і вольтметра

Вимірювання електричного опору методом амперметра і вольтметра є типовим різновидом *опосередкованих вимірювань*. Похибка вимірювання опору складається з похибок вимірювання струму та напруги амперметром і вольтметром, а також з методичної похибки, яка зумовлена споживанням потужності вимірювальними приладами і залежить від схеми їх увімкнення. Виміряне за схемою правильного вимірювання напруги (див. рисунок 7.14.а) значення опору дорівнює

$$R_{X.вим} = \frac{U_{PV}}{I_{PA} + \frac{U_{PV}}{R_{PV}}}. \quad (7.31)$$

Виміряне за схемою правильного вимірювання струму (див. рисунок 7.14.б) значення опору дорівнює

$$R_{X.вим} = \frac{U_{PV}}{I_{PA}} + R_{PA}. \quad (7.32)$$

В практиці електричних вимірювань слід вибирати ту схему вимірювання, яка забезпечує менше за модулем значення методичної похибки. Схему правильного вимірювання напруги доцільно застосовувати для вимірювання *малих опорів* ($R_X \ll R_{PV}$), а схему правильного вимірювання струму – для вимірювання *великих опорів* ($R_X \gg R_{PV}$).

Для забезпечення необхідної точності вимірювання опору необхідно не тільки правильно вибрати схему вимірювання, але й застосувати прилади відповідних класів точності і з такими границями вимірювання, щоб їх покази одержувати близько до кінця шкали.

Мостовий метод вимірювань застосовують для точних вимірювань опору в діапазоні від 10^{-8} до 10^{16} Ом. Нижня границя вимірювання одинарними мостами з двозатискачевим підключенням вимірюваного опору обмежена десятками омів через вплив опорів з'єднувальних проводів на результат вимірювання. Для зменшення такого впливу в одинарних мостах передбачають двозатискачеве підключення з лінією компенсування, три- та чотиризатискачеве підключення резисторів, завдяки якому нижня границя вимірювань одинарних мостів класу 0,05 сягає тисячних часток Ом. Дуже малі опори вимірюють подвійними мостами постійного струму, діапазон вимірювань який знаходиться у межах $10^{-8} \dots 100$ Ом. Під час прямого вимірювання опору одинарним мостом виконують одне зрівноважування, а результат вимірювань визначають за формулою

$$R_X = R_{II} \cdot \frac{R_{e1}}{R_{e2}}, \quad (7.33)$$

де R_{II} – опір плеча порівняння;

R_{e1}, R_{e2} – опори плечей відношення.

Під час вимірювань змінюють піддіапазони в одинарних мостах шляхом змінення опорів плечей відношення.

7.8 Вимірювання параметрів елементів електричних кіл змінного струму

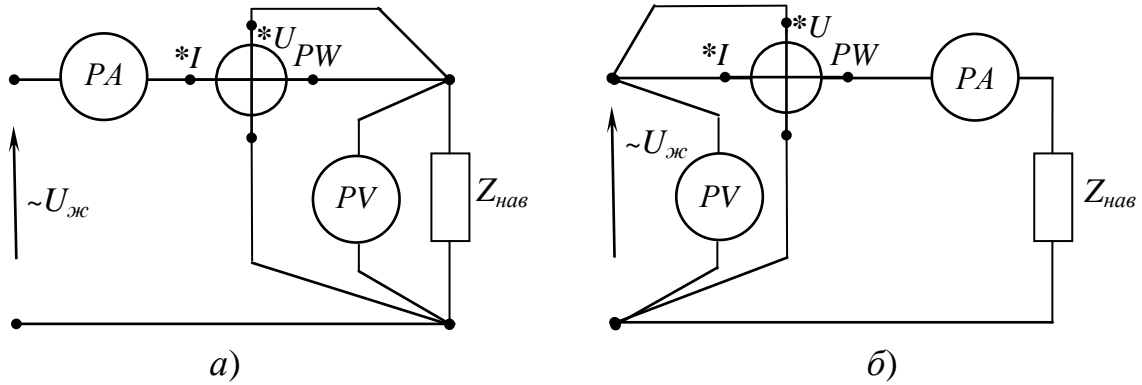
Вимірювання складових комплексного опору здійснюють за допомогою трьох приладів – амперметра, вольтметра і ватметра за схемами правильного вимірювання напруги та правильного вимірювання струму – рисунок 7.15.а та рисунок 7.15.б, відповідно.

Повний комплексний опір конденсатора чи котушки індуктивності визначається за формулою

$$Z_X = \frac{U_{PV}}{I_{PA}} = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (7.34)$$

Активна складова комплексного опору (опір втрат) визначається за формулою

$$R = \frac{P_{PW}}{I_{PA}^2} \quad \text{або} \quad R = \frac{U_{PV}^2}{P_{PW}}. \quad (7.35)$$



а - схема правильного вимірювання напруги;
б - схема правильного вимірювання струму

Рисунок 7.15 - Схема опосередкованого вимірювання складових комплексного опору

Реактивна складова комплексного опору визначається за формулою

$$X = \sqrt{Z_X^2 - R^2} = \frac{1}{I_{PA}} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 - \frac{P_{PW}^2}{I_{PA}^2}} \quad \text{або} \quad X = U_{PV} \cdot \sqrt{\frac{1}{I_{PA}^2} - \frac{U_{PV}^2}{P_{PW}^2}}. \quad (7.36)$$

де I_{PA} , U_{PV} , P_{PW} – відповідно покази амперметра PA (A), вольтметра PV (В) та ватметра PW (Вт).

Згідно формул (7.34)...(7.36) параметри досліджуваного конденсатора визначаються за формулами

- ємність

$$C_X = \frac{1}{\omega \cdot X} = \frac{I_{PA}^2}{2\pi \cdot f} \cdot \frac{1}{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}}; \quad (7.37)$$

- тангенс кута втрат

- для послідовної схеми заміщення

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega \cdot R \cdot C_X = \frac{P_{PW}}{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}}; \quad (7.38)$$

- для паралельної схеми заміщення

$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C_X} = \frac{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}}{P_{PW}}. \quad (7.39)$$

Параметри досліджуваної котушки індуктивності визначаються за формулами

- індуктивність

$$L_X = \frac{X}{\omega} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot I_{PA}^2} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}; \quad (7.40)$$

- добротність

- для послідовної схеми заміщення

$$Q = \frac{\omega \cdot L_X}{R} = \frac{1}{P_{PW}} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}; \quad (7.41)$$

- для паралельної схеми заміщення

$$Q = \frac{R}{\omega \cdot L_X} = \frac{P_{PW}}{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}}. \quad (7.42)$$

Точність вимірювань за таким методом невисока, так як вона визначається точністю використаних вимірювальних приладів та їх власним споживанням потужності, а також точністю встановлення частоти.

Для зменшення впливу на результат вимірювання потужності, яку споживають вимірювальні прилади, схему правильного вимірювання напруги (див. рисунок 7.2.а) застосовують для вимірювання порівняно малих опорів, а схему правильного вимірювання струму – для вимірювання порівняно великих опорів.

Взаємну індуктивність вимірюють опосередковано за методами вимірювання індуктивності. На рисунку 7.16 наведена схема вимірювання взаємної індуктивності за методом трьох приладів – амперметра, вольтметра та ватметра при узгодженому (рисунок 7.16.а) і зустрічному (рисунок 7.16.б) увімкненнях двох котушок L_1 та L_2 , взаємну індуктивність $M_{1,2}$ між якими необхідно виміряти.

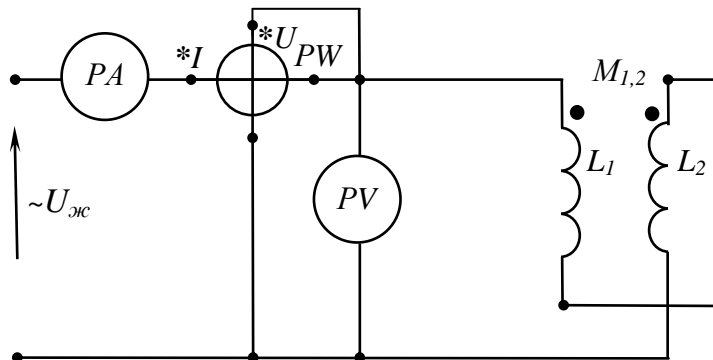


Рисунок 7.16.а - Схема вимірювання взаємної індуктивності $M_{1,2}$ при узгодженому увімкненні двох котушок L_1 та L_2

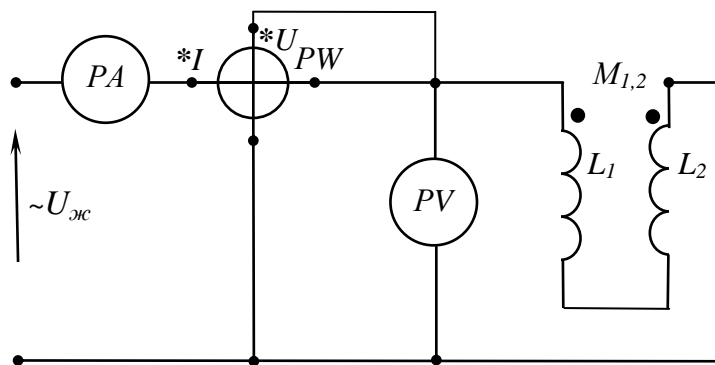


Рисунок 7.16.б - Схема вимірювання взаємної індуктивності $M_{1,2}$ при зустрічному увімкненні двох котушок L_1 та L_2

При узгодженому увімкненні котушок здійснюються вимірювання струму $I_{уз}$, напруги $U_{уз}$ та активної потужності $P_{уз}$ – це дослід I.

При зустрічному увімкненні котушок здійснюються вимірювання струму $I_{зуст}$, напруги $U_{зуст}$ та активної потужності $P_{зуст}$ – це дослід II.

Значення взаємної індуктивності $M_{1,2}$ визначається за формулою

$$M_{1,2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{уз}}{I_{уз}}\right)^2 - \left(\frac{P_{уз}}{I_{уз}^2}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{U_{зуст}}{I_{зуст}}\right)^2 - \left(\frac{P_{зуст}}{I_{зуст}^2}\right)^2}}{4 \cdot \omega}. \quad (7.43)$$

Взаємну індуктивність вимірюють за схемою, яка наведена на рисунку 7.17, за методом двох вольтметрів.

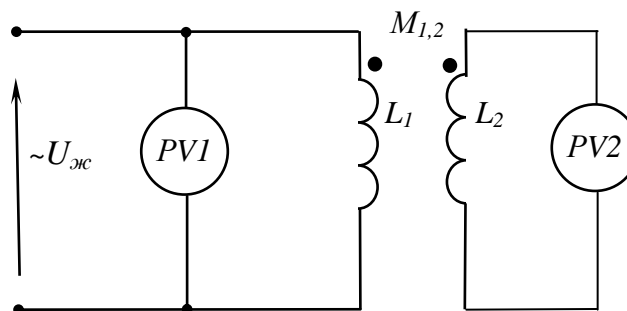


Рисунок 7.17 – Схема вимірювання взаємної індуктивності $M_{1,2}$ за методом двох вольтметрів

Значення взаємної індуктивності $M_{1,2}$ визначається за формулою

$$M_{1,2} = k_{зв} \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}, \quad (7.44)$$

де $k_{зв}$ – коефіцієнт зв'язку.

За умов, якщо $\omega L_1 \gg R_{L1}$ і $\omega L_2 \gg R_{L2}$, а опір вольтметра $PV2$ повинен бути $R_{PV2} \gg Z_{L2} = \sqrt{(\omega L_2)^2 + R_{L2}^2}$, тоді

$$k_{36} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}, \quad (7.45)$$

де w_1, w_2 – кількість витків двох котушок.

Взаємну індуктивність вимірюють за схемою, яка наведена на рисунку 7.18, за методом двох приладів – амперметра і вольтметра.

Значення взаємної індуктивності $M_{1,2}$ визначається за формулою

$$M_{1,2} = \frac{E_2}{\omega \cdot I_1} = \frac{U_{PV}}{2\pi \cdot f \cdot I_{PA}}. \quad (7.46)$$

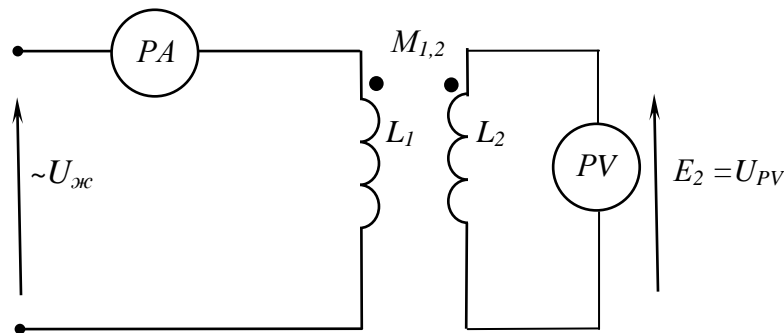


Рисунок 7.18 – Схема вимірювання взаємної індуктивності $M_{1,2}$ за методом двох приладів - амперметра і вольтметра

Резонансний метод вимірювання параметрів елементів кіл змінного струму – це метод, суть якого полягає у визначенні резонансної частоти f_0 коливного контуру, один з елементів якого є зразковий конденсатор або котушка індуктивності з точно відомим значенням ємності C_N або індуктивності L_N , а інший – це досліджуваний елемент, параметр якого (індуктивність L_X або ємність C_X) визначається за формулою

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}. \quad (7.47)$$

Резонансний метод реалізований у спеціальних вимірювальних приладах – *куметрах*, які використовують для вимірювання параметрів кіл змінного струму у широкому діапазоні частот від 1 $\kappa\Gamma\upsilon$ до 300 $M\Gamma\upsilon$.

На рисунку 7.19 наведена схема куметра, який складається з генератора високої частоти ($ГВЧ$), з вимірювального (резонансного) контуру, з індикатора

резонансу – електронного вольтметра $PV2$, який градуйований в одиницях добротності котушки індуктивності Q . Вимірювальний (резонансний) контур містить досліджувану L_X або L_N котушки індуктивності та зразковий конденсатор C_N із змінною ємністю і градуйованою шкалою.

Розглянемо як виміряти добротність котушки індуктивності куметром.

На вимірювальний контур, який містить досліджувану котушку L_X та зразковий конденсатор C_N , через ємнісний подільник $ПН$ подають невелику частину U_1 вихідної напруги U_G генератора високої частоти ГВЧ. Значення напруги U_1 необхідно підтримувати на рівні $0,2\text{ В}$ за допомогою вхідного електронного вольтметра $PV1$.

При зміні частоти вихідної напруги U_G генератора високої частоти ГВЧ виникає резонанс, при якому $\omega^2 \cdot L_X \cdot C_N = 1$ і відношення U_2/U_1 сягає максимуму

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right|_{\max} = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_N \cdot R_X} = \frac{\omega \cdot L_X}{R_X} = Q_X. \quad (7.48)$$

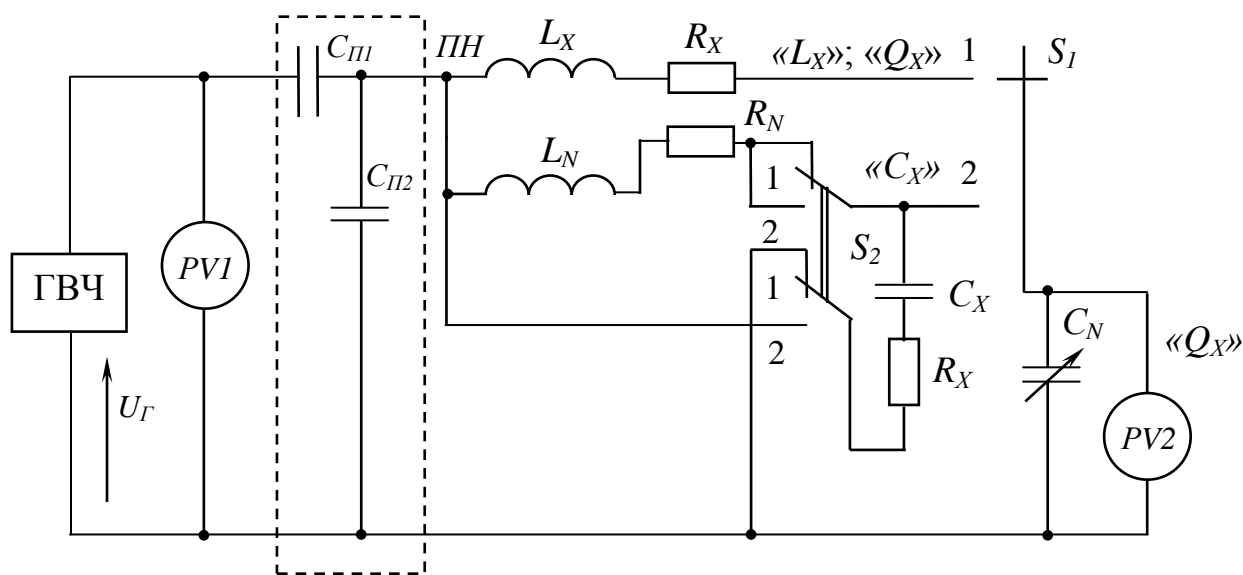


Рисунок 7.19 - Схема куметра

Максимальний показ вольтметра $PV2$ буде дорівнювати

$$U_{2\max} = U_1 \cdot Q_X. \quad (7.49)$$

Тому то при сталому значенні напруги вольтметра $PV1$ шкалу індикатора резонансу (вольтметр $PV2$) проградували безпосередньо в одиницях добротності Q . Цей й надало назву таким приладам – *куметри*. За результатами вимі-

рювань куметрами за допомогою обчислень можна визначити індуктивність, ємність, опір втрат та повний опір параметрів елементів кіл змінного струму.

Розглянемо як виміряти індуктивність котушки куметром.

Досліджувану котушку з опором R_X та з індуктивністю L_X , яку необхідно виміряти, підключають до вхідних затискачів приладу, а перемикач роду роботи S_I встановлюють в положення «1» - рисунок 7.6. Зміною частоти напруги генератора ГВЧ та ємності зразкового конденсатора C_N коливальний контур налагоджують на резонанс. Коливальний контур при такому вимірюванні містить послідовно з'єднані котушку індуктивності L_X та конденсатор C_N . Оператор здійснює відлік показів добротності, ємності C_N та резонансної частоти f_0 . За результатами вимірювань визначають реактивний опір X_L (X_C), індуктивність L_X та опір втрат R_X за відповідними формулами

$$X_L = 2\pi \cdot f_0 \cdot L_X; \quad (7.50)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_N}; \quad (7.51)$$

$$L_X = \frac{X_L}{2\pi \cdot f_0} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C_N}; \quad (7.52)$$

$$R_X = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot L_X}{Q} = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_N \cdot Q}. \quad (7.53)$$

Розглянемо як виміряти ємність конденсаторів з втратами.

Вимірювальний контур містить котушку індуктивності L_N , яка послідовно з'єднана зі зразковим конденсатором C_N (перемикач роду робіт S_I встановлюється в положення «2», « C_X »). Досліджуваний конденсатор C_X з опором втрат R_X за допомогою перемикача S_2 підключають або паралельно до зразкового конденсатора C_N або послідовно із зразковою котушкою індуктивності L_N . Особливістю вимірювання є подвійне настроювання на резонанс. Оператор при цьому виконує такий алгоритм вимірювань:

- змінюється частота напруги генератора ГВЧ та ємності конденсатора C_N ;
- вимірювальний контур настроюється на резонанс, так як контур містить послідовно з'єднані зразкову котушку індуктивності L_X та зразковий конденсатор C_N ;
- запис одержаних значень резонансної частоти f_0 , ємності C_{N1} та добротності Q_I , яка дорівнює

$$Q_I = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot L_N}{R_N} = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_{N1} \cdot R_N}, \quad (7.54)$$

де R_N – активний опір зразкової котушки індуктивності L_N ;

- перемикач S_2 встановлюють в положення «1», зразковий конденсатор C_N підключають до досліджуваного конденсатора C_X ;
- зміною ємності зразкового конденсатора C_N настраюють коливний контур на резонанс, частота генератора f_0 при цьому не змінюється;
- запис одержаних значень ємності C_{N2} і добротності Q_2 ;
- розрахунок невідомої ємності та опору втрат за формулами

$$C_X = C_{N1} - C_{N2}; \quad (7.55)$$

$$R_X = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_{N1} \cdot (Q_1 - Q_2)}. \quad (7.56)$$

Мостовий метод вимірювань параметрів комплексного опору є найдосконалішим та найкраще вивченим, так як забезпечується найвища точність та широкі функціональні можливості, незважаючи на складність будови мостів, необхідність великої кількості зразкових засобів та пристроїв керування. Розглянемо схеми вимірювальних мостів змінного струму.

На рисунку 7.20 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з малими втратами.

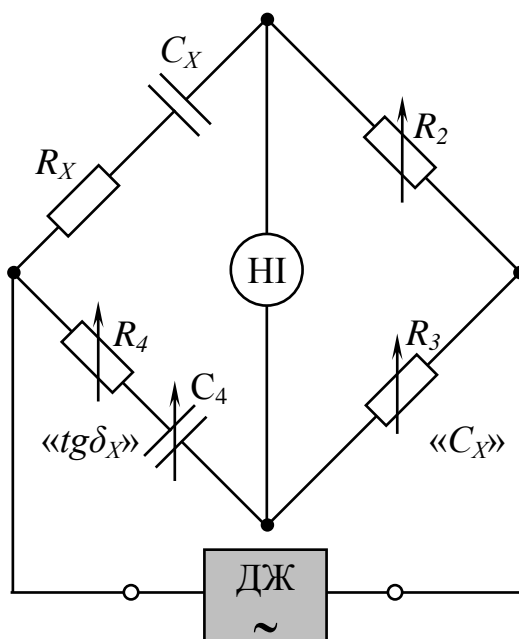


Рисунок 7.20 – Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з малими втратами

Умова рівноваги моста змінного струму при вимірюванні ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з малими втратами має вигляд

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega \cdot C_x} \right) \cdot R_3 = \left(R_4 + \frac{1}{j\omega \cdot C_4} \right) \cdot R_2, \quad (7.57)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad tg_x = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot R_4 \cdot C_4. \quad (7.58)$$

З наведених формул можна зробити, що регульовальними елементами плечей моста доцільно обирати резистори R_3 і R_4 , кожен з яких входить тільки в одне з рівнянь для визначення C_x та $tg\delta$, причому резистор R_3 можна градуювати у значеннях C_x , а резистор R_4 – у значеннях $tg\delta$.

На рисунку 7.21 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з великими втратами.

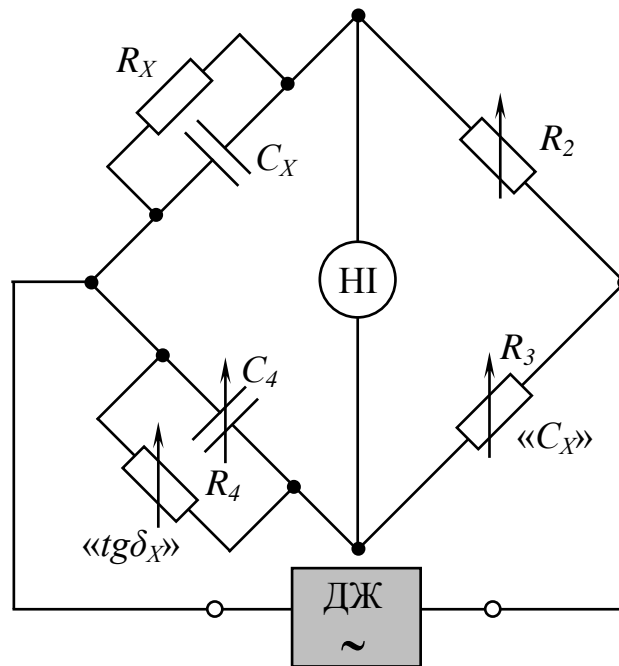


Рисунок 7.21 - Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з великими втратами

При використанні такого моста змінного струму справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad tg_x = \frac{1}{\omega \cdot C_x \cdot R_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_4 \cdot R_4}, \quad (7.59)$$

де елементами регулювання є резистор R_3 при визначенні C_x та R_4 при визначенні $tg\delta$.

На рисунку 7.22 наведена схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя.

Умова рівноваги моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя має вигляд

$$(R_x + j\omega \cdot L_x) \cdot \frac{R_3}{\left(R + \frac{1}{j\omega \cdot C_3} \right)} = R_2 \cdot R_4, \quad (7.60)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad Q_x = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_x} = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \omega \cdot C_3 \cdot R_3. \quad (7.61)$$

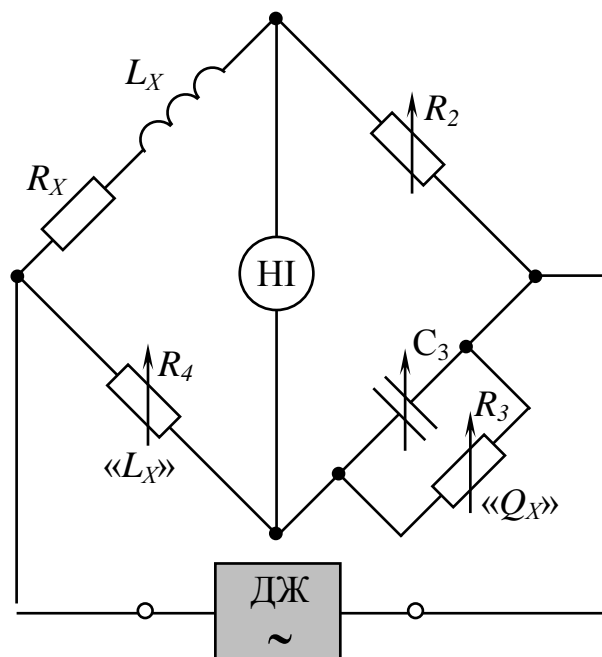


Рисунок 7.22 – Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя

На рисунку 7.23 наведена схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності з феромагнітним осердям.

При використанні такого моста змінного струму справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad Q_x = \frac{R_x}{\omega \cdot L_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_3 \cdot R_3}. \quad (7.29)$$

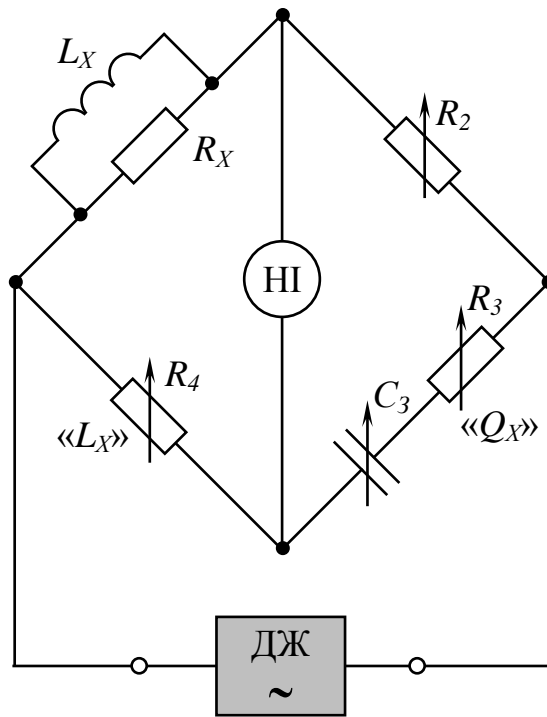


Рисунок 7.23 - Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок з феромагнітним осердям

Контрольні запитання при вивченні теми 7 (частина 2)

1. Охарактеризуйте методи та засоби для вимірювання фазового кута та коефіцієнта потужності в однофазних та трифазних колах змінного струму.
2. Наведіть схеми вимірювання фазового кута та коефіцієнта потужності в однофазних та трифазних колах змінного струму.
3. Охарактеризуйте методи та засоби для вимірювання частоти.
4. Наведіть схеми вимірювання частоти.
5. Охарактеризуйте методи та засоби для вимірювання електричного опору в колах постійного струму.
6. Наведіть схеми вимірювання електричного опору в колах постійного струму.
7. Охарактеризуйте методи та засоби для вимірювання параметрів електричних кіл: активного опору, індуктивності, взаємної індуктивності та ємності.
8. Наведіть схеми вимірювання параметрів електричних кіл: активного опору, індуктивності, взаємної індуктивності та ємності.
9. Охарактеризуйте особливості при вимірюваннях індуктивності та ємності за методом порівняння.

Список літератури

1. Нестерчук Д.М. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка,

С.В.Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.

2. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

3. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.

4. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 656 с.

5. Гуржій А.М. Електричні і радіотехнічні вимірювання / А.М. Гуржій, Н.І Поворознюк – К.: Нав. книга, 2002. – 287 с.

6. Панев Б.И. Электрические измерения. Справочник / Б.И.Панев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.

7. Измерения электрических и неэлектрических величин / Н.Н.Евтихийев, Я.А. Купершмидт и др.; Под общ. ред. Н.Н.Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

Тема 8. ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ

План лекцій

- 8.1 Загальні положення вимірювань
- 8.2 Вимірювальні перетворювачі магнітних величин
- 8.3 Вимірювання магнітного потоку
- 8.4 Вимірювання магнітної індукції та напруженості магнітного поля
- 8.5 Вимірювання феромагнітних втрат

8.1 Загальні положення вимірювань

Вимірювання магнітних величини (магнітні вимірювання) – це галузь інформаційно-вимірювальної техніки, яка займається вимірюванням величин, що характеризують магнітне поле, магнітні кола, а також магнітні властивості речовин і матеріалів (феромагнетиків).

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. Породжене електричним струмом, магнітне поле проявляється у формі силової дії на рухомий електричний заряд. Основною характеристикою силової взаємодії магнітного поля з електричним струмом є магнітна індукція - це індукція такого однорідного поля, в якому на кожний метр лінійного провідника зі струмом в один ампер (I) діє сила в один ньютон (N).

Основними величинами в галузі магнітних вимірювань є *магнітний потік, Φ , Вб*, та *напруженість магнітного поля, H , А/м*. Ці величини зв'язані функціональними залежностями з іншими магнітними величинами, а саме

- *магнітна індукція, B , Тл*

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (8.1)$$

де S – площа контуру, через який проходить магнітний потік Φ ;

- *абсолютна магнітна проникність, μ_a , Гн/м*

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_0 = \frac{B}{H}, \quad (8.2)$$

де μ – відносна магнітна проникність;

μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

- намагнічувальна сила, A

$$F = I \cdot w = H \cdot L, \quad (8.3)$$

де I - струм, що протікає в замкнутому контурі з кількістю витків w ;

L – довжина середньої лінії магнітного потоку;

- магнітний опір, $Z_M, 1/\text{Гн}$

$$Z_M = \frac{H \cdot L}{\Phi} = R_M + jX_M, \quad (8.4)$$

де R_M, X_M - активна і реактивна складові магнітного опору;

- магнітна провідність, $G_M, \text{Гн}$

$$G_M = \frac{1}{Z_M}; \quad (8.5)$$

- магнітний момент $M_M, A \cdot m^2$ - це вектор, модуль якого дорівнює добутку площі контуру S на струм, а напрям якого перпендикулярний до площі контуру, згідно формули

$$M_M = I \cdot S. \quad (8.6)$$

Важливо характеристикою магнітних матеріалів є *феромагнітні втрати*, які визначаються потужністю, що виділяється при перемагнічуванні феромагнетиків змінним струмом. При вимірюванні магнітні величини перетворюються в електричні, які зручні для вимірювань.

Перетворювачі магнітних величин в електричні будуються на основі явищ електромагнітної індукції, ядерного магнітного резонансу, гальваномагнітного ефекту, в яких сукупність магнітних величин пов'язана з вихідними електричними величинами суворими функціональними залежностями. Відповідно засоби вимірювань магнітних величини складаються з двох функціональних блоків – первинного вимірювального перетворювача магнітної величини X в електричну величину Y та вторинного вимірювального приладу, який безпосередньо вимірює величину Y .

Сучасна практика потребує вимірювань параметрів сталих магнітних полів індукцією від 10^{-16} Тл до одиниць і навіть декількох десятків Тл , а також змінних – від $10^{15} \dots 10^{-14} \text{ Тл}$ до декількох Тл в діапазоні частот від часток Гц до десятків МГц . Різноманітні й вимоги щодо точності – від $10^{-6} \dots 10^{-4} \%$ у разі знаходження значень фізичних констант до $10^{-3} \dots 1,0 \%$ під час промислових вимірювань магнітної індукції.

Забезпечення єдності магнітних вимірювань ґрунтується на трьох первинних еталонах – магнітної індукції (напруженості магнітного поля), магнітного потоку та магнітного моменту, а також на відповідних зразкових мірах магнітних величин. Еталони і міри магнітних величин використовують у схемах передачі розмірів магнітних величин від еталонів до робочих засобів вимірювань.

Зразкові та робочі міри магнітних величин застосовують для метрологічної повірки та градування відповідних вимірювальних приладів.

Еталон магнітної індукції в слабких магнітних полях є котушка Гельмгольца, яка виконана у формі кільця тороїдної форми, які побудовані на кварцовому каркасі діаметром 312 мм, при цьому відстань між ними дорівнює половині діаметра. Через котушку пропускають струм, а відтворення одиниці магнітної індукції Тл здійснюють через основні одиниці системи СІ – метр і ампер, розрахунковим методом. Еталон забезпечує відтворення одиниці магнітної індукції в діапазоні $5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$ із похибкою не більшою, ніж $\pm 0,00025 \%$.

Метрологічною основою вимірювань середніх постійних магнітних полів у діапазоні від 0,005 Тл до 2,0 Тл є спеціальний еталон – електромагніт із стабілізатором магнітної індукції в зазорі. Похибка відтворення одиниці магнітної індукції не перевищує $\pm 0,001 \%$.

Метрологічною основою вимірювань сильних постійних магнітних полів у діапазоні від 2,0 Тл до 10 Тл є спеціальний еталон – надпровідна котушка, яка відтворює одиницю магнітної індукції з похибкою, не більшою, ніж $\pm 0,001 \%$.

Міри магнітної індукції (напруженості магнітного поля) поділяють на дві групи:

- міри у формі котушок, по обмотках яких протікає електричний струм;
- у формі постійних магнітів.

В області слабких магнітних полів у діапазоні від 10^{-12} Тл до 10^{-2} Тл застосовують міри магнітної індукції у формі котушок Гельмгольца. Магнітна індукція такої міри визначається розрахунковим методом в залежності від форми котушки, виду її обмотки і кількості витків та сили струму в обмотці за виразом

$$B = \frac{16}{5\sqrt{5}} \cdot \mu_0 \cdot \frac{w}{D} \cdot I = k_B \cdot I, \quad (8.7)$$

де w – кількість витків обмотки;

D – середній діаметр котушки;

I – струм в обмотці;

k_B – стала міри магнітної індукції; $k_B = \frac{B}{I}; [\text{Тл} / \text{А}]$

Похибка відтворення одиниці магнітної індукції в таких мірах не перевищує 0,01 %.

В області середніх магнітних полів (0,05...2,0 Тл) міри магнітної індукції виконують у формі постійних магнітів, а в області сильних магнітних полів (2...20 Тл) - у формі потужних надпровідних котушок.

Державний еталон магнітного потоку – це котушка Кемпбелла, первинна обмотка якої складається з двох однакових секцій, з'єднаних послідовно, а вторинна обмотка з більшим діаметром розміщена у симетричній площині між секціями первинної обмотки. За конструкцією котушка Кемпбелла є поєднанням міри напруженості магнітного поля та вимірювальної котушки. Магнітне поле, яке створене струмом в первинній обмотці (міра напруженості магнітного поля), пронизує витки вторинної обмотки (вимірювальної котушки). Потокочеплення ψ , яке виникає при значенні струму 1 А в намагнічувальній обмотці, має назву *стала міри магнітного потоку* $k_{\phi} = \frac{\psi}{I}; [Вб / А]$.

Номинальне значення сталої магнітного потоку $k_{\phi H} = 10^{-2} Вб/А$ знаходиться розрахунковим методом на основі геометричних розмірів котушки та кількості витків обмоток з похибкою, не більшою від $\pm 0,001$ %.

Міри магнітного потоку застосовують для метрологічної повірки та градування вимірювальних приладів магнітного потоку – веберметрів, флюксметрів, а також для визначення сталих вимірювальних котушок. Міри магнітного потоку будують на основі котушок Кемпбелла та котушок Гельмгольца в поєднанні із розташованою в її центрі вторинною обмоткою, а також котушок з двома одношаровими обмотками, які розміщені на одному каркасі.

Первинний еталон магнітного моменту побудований у формі еталонних вимірювальних котушок, намотаних на кварцові труби. Еталон забезпечує відтворення одиниці магнітного моменту з похибкою, не більшою від $\pm 0,05$ %.

Міри магнітного моменту поділяються на дві групи:

- міри у формі вимірювальних котушок, по обмотках яких протікає струм;
- постійні магніти у формі еліпсоїдів обертання та циліндрів.

Основною характеристикою вимірювальної котушки є її стала k_{Sw} , яку визначають як добуток кількості витків w на площу S поперечного перерізу каркасу круглої або циліндричної форми

$$k_{Sw} = w \cdot S. \quad (8.8)$$

Магнітний момент визначається за значенням вимірюваного струму за виразом

$$M_M = k_{Sw} \cdot I. \quad (8.9)$$

Сталу вимірювальної котушки знаходять експериментально, похибка відтворення одиниці магнітного моменту за допомогою вимірювальних котушок становить 0,05...1,0 %.

8.2 Вимірювальні перетворювачі магнітних величин

Для вимірювання магнітних величин електричними методами їх необхідно перетворити в електричні величини, для цього застосовуються перетворювачі магнітних величин в електричні. Вимірювальні перетворювачі, вхідною величиною яких є магнітна величина, має назву *магнітовимірювальними* і залежно від виду вихідної величини поділяються на три основні групи:

- *магнітоелектричні перетворювачі* – вихідна величина електрична;
- *магнітомеханічні перетворювачі* – вихідна величина механічна;
- *магнітооптичні перетворювачі* – вихідна величина оптична.

Магнітоелектричні перетворювачі є найпоширенішими у галузі магнітних вимірювань є такими, що забезпечують найвищу точність вимірювання магнітних величин. Серед магнітоелектричних перетворювачів найпоширенішими є *індукційні, феромодуляційні, гальваноманітні та квантові*.

Розглянемо магнітоелектричні перетворювачі більш детально.

Індукційні магнітоелектричні перетворювачі.

Принцип дії індукційного перетворювача базується на явищі електромагнітної індукції. Найбільш поширеним видом індукційного перетворювача є *вимірювальна котушка* з кількістю витків w_k , яка розташовується в вимірювальному магнітному полі. При зміні магнітного потоку Φ_x , який проходить через площину S , охоплену витками вимірювальної котушки, виникає ЕРС $e = -w_k \cdot \frac{d\Phi_x}{dt}$.

В результаті відбувається перетворення магнітної величини в електричну – ЕРС або струм, що наводиться в колі котушки, після обробки електричної величини вторинним вимірювальним приладом визначається магнітний потік Φ_x та пов'язані з ним магнітні величини. Таку вимірювальну котушку називають *індукційно-імпульсним перетворювачем*. В залежності від призначення вимірювальні котушки мають різну конструкцію – безкаркасні або з каркасом (круглі, квадратні, прямокутні), виготовлені із ізоляційного матеріалу; одношарові та з багатошаровою обмоткою.

Вимірювальні котушки застосовують для вимірювань характеристик як змінних, так й постійних магнітних полів.

Якщо *магнітне поле постійне*, то необхідно змінити магнітний потік, що зчіплюється з витками котушки. Змінити потокозчеплення можна одним із способів: швидко винести вимірювальну котушку за межі магнітного поля або по-

вернути її на 180^0 ; обертати котушку в полі, що досліджується, зі сталою швидкістю; коливати котушку відносно її середнього положення.

Як інтегруючий вимірювальний прилад у магнітних вимірюваннях застосовують *веберметр*.

Для вимірювань параметрів *змінних магнітних полів* застосовують нерухомі вимірювальні котушки. Якщо крива магнітного потоку Φ_x симетрична відносно осі часу, то амплітуда наведеної в котушці ЕРС, E_m , пов'язана з амплітудою вимірюваного потоку Φ_{xm} співвідношенням

$$E_m = \omega \cdot w \cdot \Phi_{xm}, \quad (8.10)$$

Середнє випрямлене $E_{сеп}$ та середнє квадратичне значення E ЕРС пов'язані співвідношенням

$$E_{сеп} = \frac{E}{k_{\Phi_x}} = 4 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_{xm}, \quad (8.11)$$

де ω – колова частота зміни магнітного потоку;

f – циклічна частота зміни магнітного потоку;

k_{Φ_x} - коефіцієнт форми кривої потоку.

Для вимірювання магнітного потоку змінного магнітного поля за допомогою індукційних перетворювачів застосовують вторинні прилади середньовипрямлених та середньоквадратичних значень.

Феромодуляційні перетворювачі – ферозонди. Це система із двох однакових стержневих магнітопроводів, які виконані з матеріалів з високою магнітною проникністю (пермалої), з нанесеними на кожний з них двома обмотками, причому $w_1 = w_2$. Обмотки мають назву *обмотки збудження*. Вони з'єднані таким чином, що створювані ними магнітні потоки направлені назустріч один одному. Принцип дії таких перетворювачів полягає у використанні зміни магнітної проникності феромагнетика, який намагнічується змінним магнітним полем, при одночасній дії на нього постійного магнітного поля, напруженість якого вимірюється.

На рисунку 8.1 схематично зображений двох стержневий ферозонд із поздовжнім збудженням. Ферозонд складається з двох стержнів 1 і 2 із пермалою, на які намотані намагнічувальні обмотки w_{H1} та w_{H2} , з'єднані послідовно зустрічно. Вимірювальна котушка w_B охоплює обидва стержні.

Намагнічувальне поле H_H створюється намагнічувальним струмом I_H від джерела живлення (ДЖ) з частотою f , який протікає по намагнічувальним обмоткам w_{H1} та w_{H2} . Слід відзначити, що амплітуда намагнічувального поля H_{Hm} повинна бути достатньою для намагнічування стержнів до насичення.

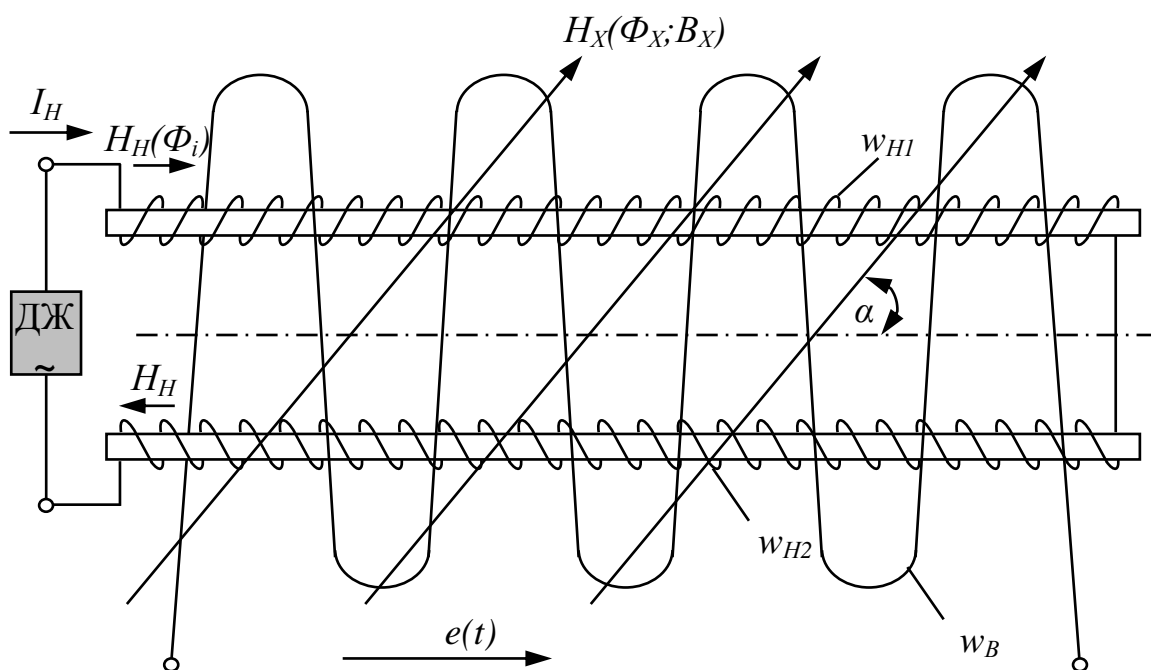


Рисунок 8.1 – Схематичне зображення ферозонда

При відсутності поля, що досліджується, та за умови повної ідентичності обох частин ферозонда ЕРС, яка наводиться у вимірювальній котушці дорівнює нулю, так як потоки симетричні. Якщо ферозонд помістити в магнітне поле з напруженістю H_x , то потоки стають не симетричними: в одному стержні потоки Φ_M та Φ_x додаються, а в другому – віднімаються, як наслідок, у вимірювальній котушці наводиться ЕРС з парними гармоніками. Для виділення вимірювального інформативного сигналу застосовується фільтр, який налагоджений на другу гармоніку. Вона й несе інформацію щодо вимірювану індукцію (напруженість) магнітного поля.

Істотною перевагою ферозондів є їх висока чутливість і здатність вимірювати характеристики як постійних, так й змінних магнітних полів від 10^{-14}Тл з похибкою $\pm (1...2) \%$.

Гальваномагнітні перетворювачі. У гальваномагнітних перетворювачах використовуються ефекти, що виникають у напівпровідниках або металах зі струмом, які знаходяться в магнітному полі. Такі ефекти основані на зміні їх електричного стану або фізичних властивостей під дією магнітного поля.

Найбільш широко для магнітних вимірювань використовуються ефект Холла та ефект Гаусса. Перетворювачі, які побудовані на ефекті Холла, мають назву *перетворювачі Холла* або *магнітогенератори*, а перетворювачі, які побудовані на ефекті Гаусса – *магніторезистори*.

Розглянемо *перетворювачі Холла* більш детально. Принцип дії перетворювачів Холла полягає у виникненні на гранях провідної пластини – рисунок

9.2, поперечної ЕРС E_x , поміщеної в магнітне поле перпендикулярно до вектора магнітної індукції B , за умови, що в повздовжньому напрямі по ній протікає струм I .

Різниця потенціалів, яка виникає між гранями пластини, має назву ЕРС Холла, вона пов'язана з вимірюваною магнітною індукцією співвідношенням

$$E_x = \frac{R_x \cdot I \cdot B}{d}, \quad (8.12)$$

де R_x – постійна Холла, яка залежить від властивостей матеріалу пластини;

I – струм;

B – магнітна індукція;

d – товщина пластини.

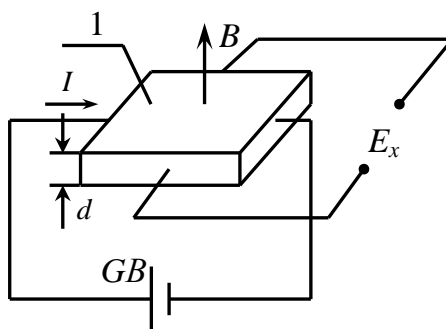


Рисунок 8.2 – Схема перетворювача Холла

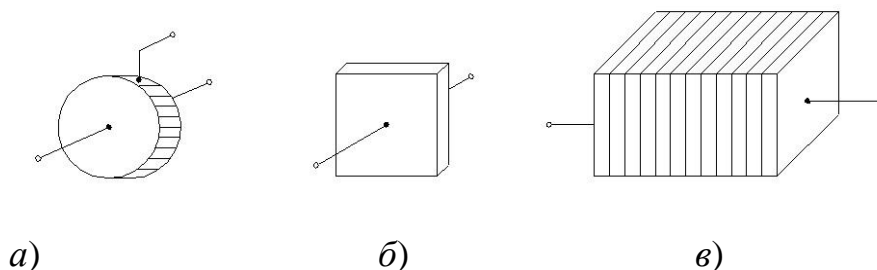
Пластина (1) перетворювача Холла має малі розміри (до 1...1,5 мм), тому за допомогою такого перетворювача можна вимірювати магнітну індукцію в малих зазорах. Матеріали для виготовлення пластини перетворювача Холла – це германій, кремній, арсенід галію, сурм'янистий індій.

Перетворювачі Холла застосовуються для вимірювання як постійних, так й змінних магнітних полів у широкому діапазоні частот. Похибка перетворювачів складає $\pm (1...3)\%$. Недоліками перетворювачів є невисока чутливість та сильна залежність постійної Холла від температури.

Перетворювачі Гаусса – це такі перетворювачі, які використовують ефект Гаусса та мають назву магніторезистори.

Магніторезистори – це перетворювачі, принцип дії яких оснований на магнітоелектричному ефекті (ефекті Гаусса), згідно якого внутрішній опір напівпровідників змінюється внаслідок відхилення траєкторії носіїв заряду від лінійної під впливом зовнішнього магнітного поля. Для виготовлення таких перетворювачів використовують вісмут, сурм'янистий нікель. Вихідною величиною магніторезисторів є відносна зміна опору матеріалу під дією магнітної індукції. Кількісно магнітоелектричний ефект проявляється по-різному і залежить від матеріалу магніторезистора та його форми. В провідникових матеріалах та-

кий ефект проявляється слабо, значно сильніше він проявляється в напівпровідниках. На рисунку 8.3 наведений зовнішній вигляд магніторезисторів різних форм.



а)

б)

в)

а - магніторезистор типу «диск Корбіно»;

б - магніторезистор прямокутної форми;

в - магніторезистор прямокутної форми з провідниковими прокладками

Рисунок 8.3 - Зовнішній вигляд магніторезисторів різних форм

У слабких магнітних полях магнітоелектричний ефект проявляється найсильніше, тому то застосовується конструкція магніторезистора типу «диск Корбіно» (рисунок 8.3.а), коли один електрод розміщується в центрі, а другий – на торці. Внутрішній опір магніторезистора малий ($0,1 \dots 1,0 \text{ Ом}$), залежність відносної змінної питомого опору від величини магнітної індукції нелінійна у досить широкому діапазоні її зміни.

У магніторезисторах прямокутної форми (рисунок 8.3.б) магнітоелектричний ефект проявляється менш сильно, вони мають значно більший внутрішній опір (до сотень Ом), а також ширший діапазон сталої чутливості.

Збільшення магнітоелектричного ефекту стало можливим у конструкціях магніторезисторів, які складаються з ряду прямокутних напівпровідникових пластин, з'єднаних послідовно і розділених провідниковими прокладками – рисунок 8.3.в.

Магніторезистори застосовують переважно для вимірювального перетворення магнітної індукції постійних і змінних магнітних полів у діапазоні $0,3 \dots 10 \text{ Тл}$ в зміну електричного опору.

Ядерні перетворювачі. Такі перетворювачі магнітної індукції належать до групи *квантових перетворювачів*, робота яких основана на взаємодії мікрочастинок з магнітним полем, такими мікрочастинками є ядра атомів речовини, яка має момент кількості руху. Відношення магнітного моменту мікрочастинки до її механічного моменту має назву *гіромагнітне відношення* і позначається γ .

Магнітні моменти ядер речовини, яка внесена в постійне магнітне поле, орієнтуються в напрямку цього поля. При зміні напрямку зовнішнього поля ядерний магнітний момент починає прецесувати відносно нового напрямку вектора магнітної індукції, а саме, вектор магнітного моменту буде обертатись з часто-

тою $\omega = \gamma \cdot B$ відносно вектора магнітної індукції, створюючи конус з кутом φ при вершині. З часом процес затухає, при цьому кут φ прецесії прямує до нуля, а речовина набуває стаціонарної намагніченості, вектор якої збігається з новим напрямом вектора магнітної індукції зовнішнього поля.

Для вимірювань магнітної індукції слабких магнітних полів використовують тесламетри на базі ядерного магнітного резонансу (*ЯРМ-тесламетри*), які основані на принципі вільної ядерної прецесії – рисунок 8.4.

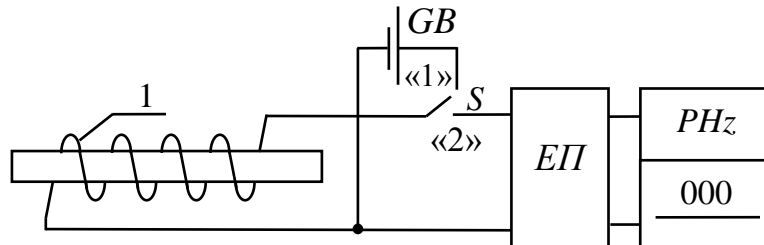


Рисунок 8.4 – Схема ЯРМ-тесламетра за методом вільної ядерної прецесії

Перетворювач для вимірювання слабких магнітних полів на основі ядерного магнітного резонансу має ампулу з водою 1 як з робочою речовиною, яка розташована всередині котушки індуктивності. При пропусканні струму через котушку індуктивності (перемикач S у положенні «1») створюється попередня поляризація в напрямі вектора магнітної індукції, який перпендикулярний до вектора індукції вимірюваного поля. Потім котушка індуктивності відмикається від джерела живлення (перемикач S у положенні «2»), вимірюється частота ЕРС, що наводиться в котушці за рахунок прецесії. Наведена ЕРС підсилюються електронним підсилювачем ЕП, а її частоту вимірює цифровий частотомір PHz. За значенням вимірної частоти прецесії визначається значення магнітної індукції. Так як частоту прецесії за допомогою цифрових частотомірів можна виміряти з похибкою, меншою від $\pm 10^{-4}\%$, то магніторезонансний перетворювач забезпечує можливість вимірювання магнітної індукції з похибкою, меншою від $\pm 0,005\%$. Найпоширеніші магніторезонансні перетворювачі для вимірювання магнітної індукції в діапазоні від 0,0001 до 0,1 Тл з абсолютною похибкою $\pm (0,02 \dots 2,0)$ Тл.

8.3 Вимірювання магнітного потоку

Розглянемо вимірювання сталого магнітного потоку індукційно-імпульсним методом. Суть методу полягає у тому, що вимірювальний магнітний потік Φ_x , який перетинає витки рухомої вимірювальної котушки (ВК), викликає в ній появу ЕРС, значення якої знаходять за формулою

$$e_x(t) = -\frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\Phi_x}{dt}. \quad (8.13)$$

Для вимірювання сталого магнітного потоку індукційно-імпульсним методом використовується спеціальний прилад – *веберметр*, основу якого становить магнітоелектричний вимірювальний механізм. Від звичайного магнітоелектричного вимірювального механізму він відрізняється тим, що в ньому відсутні протидіючі пружинки, а струм до рухомої рамки підводиться за допомогою струмопроводів з незначним протидіючим моментом. Кут повороту α рухомої частини буде пропорційний до імпульсу ЕРС $e_x(t)$, яка наводиться у вимірювальній котушці, яка підключена до рамки вимірювального механізму приладу

$$\alpha = S_\phi \int_0^\tau e_x(t) dt = S_\phi \cdot w \cdot \Phi_x, \quad (8.14)$$

де S_ϕ – чутливість веберметра по магнітному потоку.

Покази веберметрів пропорційні до вимірювального потоку Φ_x і практично не залежать від опору зовнішнього кола, що дає можливість градуювати шкалу приладу безпосередньо в одиницях магнітного потоку.

Розглянемо вимірювання періодично змінного магнітного потоку - рисунок 8.5.

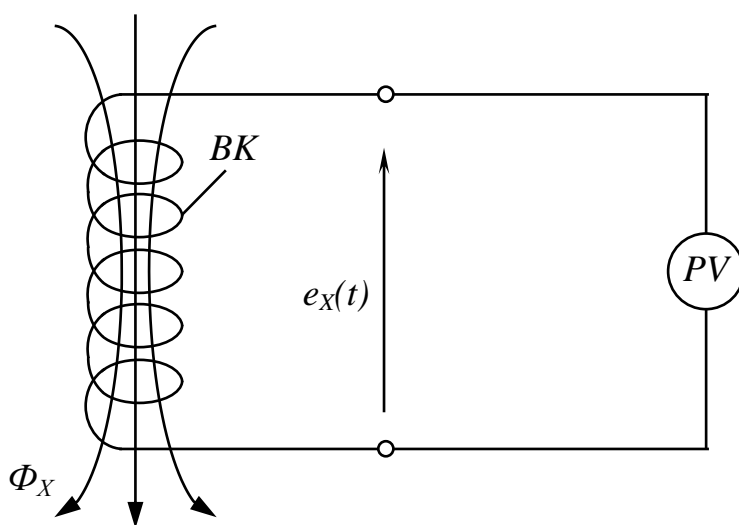


Рисунок 8.5 – Схема вимірювання змінного магнітного потоку за допомогою вимірювальної котушки

Суть метода вимірювання змінного потоку Φ_x полягає у тому, що в нерухомій вимірювальній котушці наводиться ЕРС $e_x(t)$, яка вимірюється за допомогою вольтметра – рисунок 8.5. Якщо крива потоку симетрична відносно осі часу, то його амплітудне значення дорівнює

$$\Phi_m = \frac{E_{сер}}{4f \cdot w}, \quad (8.15)$$

де $E_{сер}$ – середньо випрямлене значення ЕРС $e_x(t)$, В.

Значення Φ_X визначається також за формулою

$$\Phi_m = \frac{E}{4f \cdot w \cdot k_{\Phi_X}}, \quad (8.16)$$

де E – середньоквадратичне або діюче значення ЕРС $e_X(t)$, В;

k_{Φ_X} – коефіцієнт форми кривої потоку Φ_X .

Формулою (8.16) користуються лише тоді, коли форма кривої потоку точно відома і відоме значення k_{Φ_X} , наприклад, для синусоїдної форми $k_{\Phi_X} = 1,11$. Загалом магнітний потік має спотворену форму кривої, яка відмінна від синусоїдної, тому то для уникнення похибки від форми кривої доцільнішим є вимірювання $E_{сер}$ вольтметром середніх значень та обчислення Φ_m за формулою (8.15).

8.4 Вимірювання магнітної індукції та напруженості магнітного поля

Для вимірювання індукції магнітного поля використовуються спеціальні вимірювальні прилади – *тесламетри*. Перетворювачі в таких приладах – це перетворювачі Холла. На гранях перетворювачів Холла виникає ЕРС, значення якої пропорційне магнітній індукції, в подальшому ця ЕРС підсилюється вимірювальним підсилювачем і надходить для вимірювання до магнітоелектричного мілівольтметром, покази якого при сталому значенні струму градуйовані безпосередньо в одиницях магнітної індукції. Перевагами приладів з перетворювачами Холла є можливість вимірювань як у постійних, так і у змінних магнітних полях, малі габарити самого перетворювача і досить висока точність вимірювань. Недоліком є порівняно велика залежність ЕРС від температури, що вимагає спеціальної температурної компенсації.

Для вимірювання магнітної індукції та напруженості магнітного поля призначений *метод амперметра та вольтметра*, який є найпростішим методом визначення *динамічних характеристик магнітних матеріалів*, тобто характеристик у змінному магнітному полі. Вимірювання здійснюються за схемою, що наведена на рисунку 8.6.

На зразок із досліджуваного магнітного матеріалу намотують дві обмотки: намагнічувальну із кількістю витків w_1 і вимірювальну із кількістю витків w_2 . Через намагнічувальну обмотку від звукового генератора ЗГ пропускають намагнічувальний струм I , значення якого вимірюють амперметром. Вольтметром PVI вимірюють ЕРС $e_2(t)$ вторинної обмотки. Якщо активний опір намагнічувальної котушки w_1 великий, то намагнічувальний струм I та напруженість магнітного поля H практично синусоїдні, а індукція B – несинусоїдна.

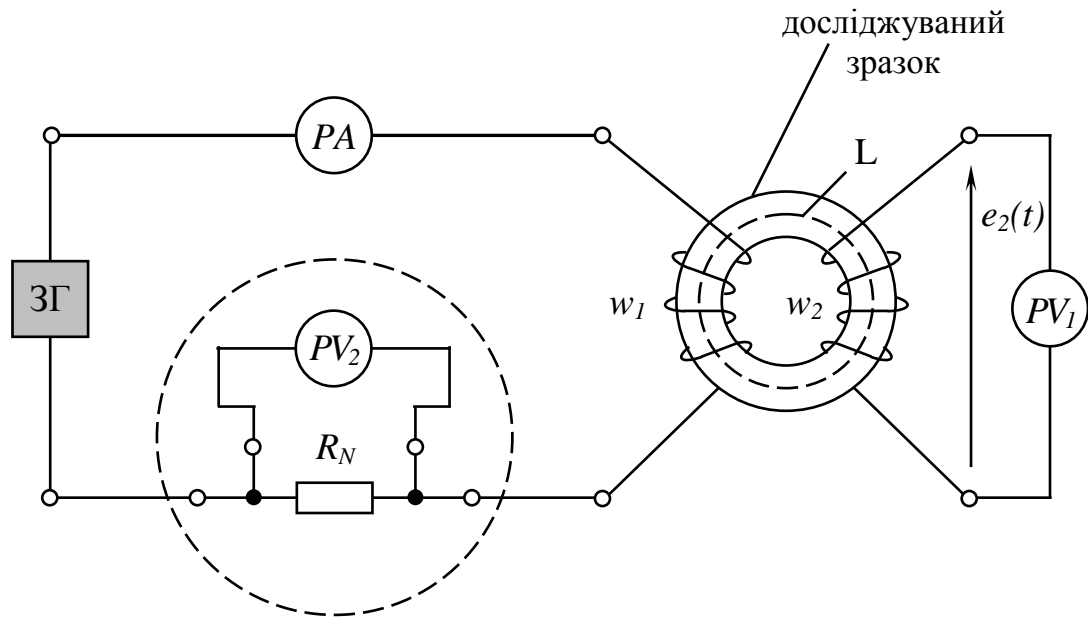


Рисунок 8.6 – Схема вимірювання магнітної індукції та напруженості магнітного поля за методом амперметра та вольтметра

За допомогою амперметра середньоквадратичних значень вимірюються середньоквадратичні значення намагнічувального струму I , а амплітудне значення напруженості магнітного поля H_m визначається за виразом

$$H_m = \frac{w_1 \cdot I \cdot \sqrt{2}}{L}, \quad (8.17)$$

де L – довжина середньої лінії магнітного потоку в зразку із досліджуваного матеріалу, м.

Для визначення амплітудного значення B_m несинусоїдної магнітної індукції необхідно вольтметром середньовипрямлених значень виміряти середнє значення ЕРС $e_2(t)$, наведеної в обмотці w_2 , тоді

$$B_m = \frac{E_{сеп}}{4 \cdot f \cdot w_2 \cdot S}, \quad (8.18)$$

де S – площа поперечного перерізу зразка, m^2 .

Якщо активний опір намагнічувальної обмотки малий, то практично забезпечується режим синусоїдної магнітної індукції, а напруженість магнітного поля буде несинусоїдною. У такому разі амплітудне значення H_m напруженості магнітного поля, знайдене за виразом (8.17), може істотно (на 8...10 %) відрізнятися від істинного значення максимальної напруженості.

Точніше максимальне значення напруженості можна встановити за показами вольтметра $PV2$, який вимірює спад напруги на зразковому резисторі R_N , при цьому

$$H_m = \frac{w_1 \cdot I_m}{L} = \frac{w_1}{L} \cdot \frac{U_m}{R_N}. \quad (8.19)$$

Для вимірювання синусоїдної ЕРС $e_2(t)$, яка наводиться в обмотці w_2 , слід застосовувати вольтметр середньоквадратичних значень, при цьому максимальне значення B_m індукції визначається за формулою

$$B_m = \frac{E}{4 \cdot f \cdot w_2 \cdot S \cdot k_\phi}, \quad (8.20)$$

де k_ϕ – коефіцієнт форми кривої ЕРС (для синусоїди $k_\phi = 1,1$).

Діапазони вимірювань магнітної індукції та напруженості магнітного поля методом амперметра та вольтметра, а також частотний діапазон і точність вимірювань повністю визначаються характеристиками використаних приладів. Застосування сучасних прецизійних електронних та цифрових амперметрів та вольтметрів має змогу розширити можливості амперметра і вольтметра.

Найвищу точність та чутливість вимірювання магнітної індукції забезпечують квантові перетворювачі у складі ЯМР-тесламетра та ферозонди у складі феромодуляційного тесламетра.

8.5 Вимірювання феромагнітних втрат

Під час перемагнічування феромагнітного матеріалу змінним струмом наявна втрата потужності, яка зумовлена втратами на гістерезис і вихрові струми, які загалом мають назву *феромагнітні втрати*. Такі втрати можна виміряти за допомогою ватметра (амперметр і вольтметр використовуються для контролю струму та напруги, які подаються на ватметр) – рисунок 8.7.

Включення кола напруги ватметра до вторинної обмотки w_2 досліджуваного зразку дає змогу вимірювати тільки втрати в сталі, однак у такому разі необхідно покази ватметра приводити до намагнічувальної обмотки, тобто помножувати на відношення $\frac{w_1}{w_2}$. Потужність феромагнітних втрат дорівнює

$$P_{BTP} = P_{PW} \frac{w_1}{w_2}. \quad (8.21)$$

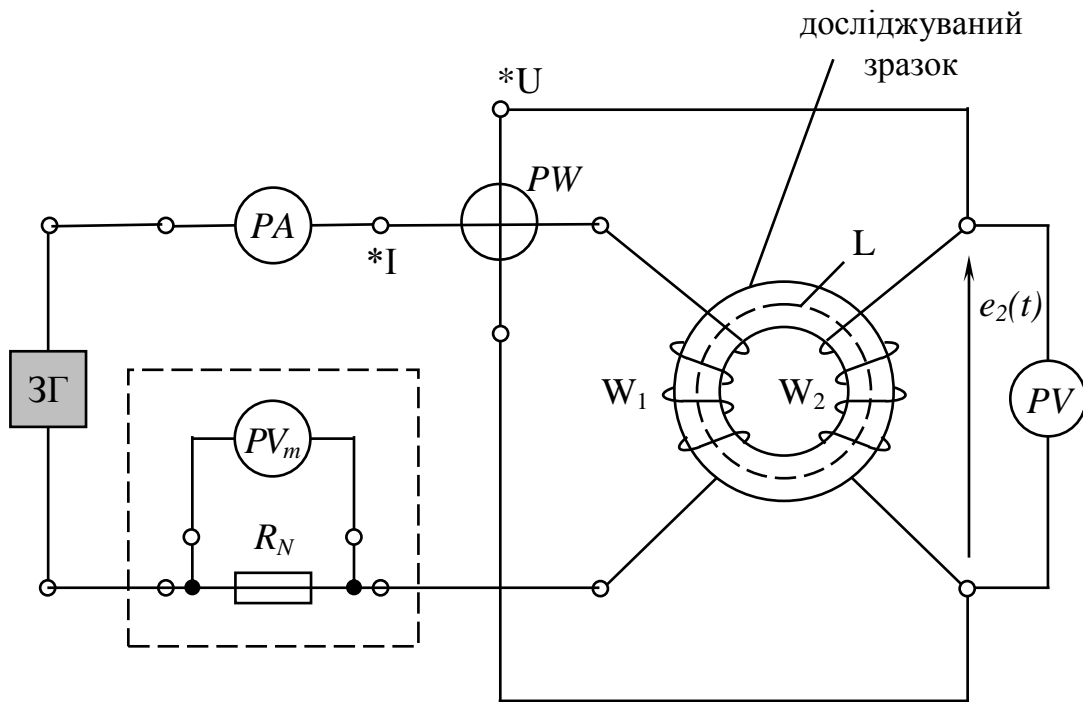


Рисунок 8.7 – Схема вимірювання феромагнітних втрат за допомогою ватметра

При вимірюванні малих потужностей доцільно користуватись ватметрами з $\cos\varphi = 0,1$, а також вводити поправку для виключення похибки методу, зумовленої споживанням енергії самими приладами, отже $P_{ВТР}$ визначається за формулою

$$P_{ВТР} = P_{PW} \cdot \frac{w_1}{w_2} - U^2 \cdot \left(\frac{1}{R_{PV}} + \frac{1}{R_{PWU}} \right), \quad (8.22)$$

де U – показ вольтметра, B ;

R_{PV}, R_{PWU} – опори вольтметра та кола напруги ватметра відповідно, $Ом$.

Якщо необхідно, коло струму ватметра можна вмикати через вимірювальний трансформатор струму.

Феромагнітні втрати можна також вимірювати за допомогою компенсаторів і мостів змінного струму, однак порівняно з вищенаведеним методом ватметра ці методи не поширені.

Контрольні запитання при вивченні теми 8

- 1 Поясніть принцип індукційного перетворювача магнітного потоку на прикладі вимірювальної котушки.
- 2 Поясніть принцип дії диференціального ферозонда.
- 3 Поясніть принцип феромодуляційного тесла метра.

- 4 Поясніть принцип дії ЯРМ-тесламера за методом вільної ядерної прецесії.
- 5 Поясніть суть індукційно-імпульсного методу визначення магнітних петель гістерезису.
- 6 Поясніть суть ватметрового методу вимірювання питомих магнітних втрат.
- 7 Які існують методи для вимірювання магнітного потоку в постійних та в змінних магнітних полях?
- 8 Поясніть принцип дії гальваномагніторекombaційних перетворювачів.
- 9 Опишіть принцип дії гальваномагнітних перетворювачів та магніторезистивних перетворювачів.

Список літератури

1. Нестерчук Д.М. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.
2. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
3. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
4. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 656 с.
5. Гуржій А.М. Електричні і радіотехнічні вимірювання / А.М. Гуржій, Н.І.Поворознюк – К.: Нав. книга, 2002. – 287 с.
6. Панев Б.И. Электрические измерения. Справочник / Б.И.Панев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.
7. Измерения электрических и неэлектрических величин / Н.Н.Евтихийев, Я.А. Купершмидт и др.; Под общ. ред. Н.Н.Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

Тема 9. ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ

План лекцій

- 9.1 Загальні положення вимірювань
- 9.2 Параметричні вимірювальні перетворювачі: резистивні; ємнісні; індуктивні перетворювачі
- 9.3 Генераторні вимірювальні перетворювачі: індукційні; п'єзоелектричні; трансформаторні; магнітопружні; електретні; термоелектричні; фотоелектричні перетворювачі
- 9.4 Методи та засоби вимірювання температури
- 9.5 Методи та засоби вимірювання механічних величин
- 9.6 Методи та засоби вимірювання рівня рідин

9.1 Загальні положення вимірювань

Вимірювання неелектричних величин досягло високого розвитку і є найбільшою та найрозвиненою галуззю інформаційно-вимірювальної техніки, а виробництво приладів для вимірювання різних неелектричних величин фізичної природи є основною частиною продукції приладобудування. Велика кількість вимірюваних неелектричних величин, розкиданість досліджуваних об'єктів у просторі, необхідність автоматизації керування для централізованого отримання вимірювальної інформації, опрацювання цієї інформації та вироблення сигналів для зворотної дії на об'єкт дослідження зумовлюють використання переважно електричних методів вимірювань неелектричних величин, так як електричні сигнали найпридатніші як для вимірювань, так й для опрацювання та передавання на відстані. В сучасній промисловості, науці, енергетиці, на транспорті та в інших галузях народного господарства має місце надзвичайно швидке зростання кількості фізичних величин, які необхідно вимірювати та контролювати. Фахівцям необхідно вміти вимірювати чи контролювати понад 2000 величин, а існуючі методи і засоби дають можливість вимірювати лише 400...500 таких величин. При цьому кількість неелектричних величин, які необхідно вимірювати, значно перевищує кількість вимірюваних електричних і магнітних величин.

Таким чином, широкий спектр вимірюваних неелектричних величин, недостатнє вивчення методів їх вимірювання, метрологічна незабезпеченість визначають особливості вимірювання таких величин, а саме, *при вимірюванні неелектричних величин широко застосовуються електричні методи вимірювання,*

тобто виконується «електрифікація» таких вимірювань – перетворення неелектричної величини в електричну.

Це зумовлює наявність *первинного вимірювального перетворювача* (ПВП) в структурі засобу вимірювання неелектричних величин, що здійснює попереднє перетворення досліджуваної неелектричної величини у функціонально пов'язану з нею електричну величину, *вторинного вимірювального приладу* (ВВП), а також *пристроїв їх спряження* – лінії зв'язку вимірювальні підсилювачі, пристрої гальванічної розв'язки вимірювальних кіл, пристрої коригування похибок.

Залежно від типу первинного вимірювального перетворювача і вигляду його вихідного інформативного параметра використовуються ті чи інші технічні засоби електровимірювальних приладів. У більшості випадків апаратна частина вторинних приладів для вимірювання неелектричних величин істотно не відрізняється від приладів для вимірювання електричних величин.

Оскільки вихідними інформативними параметрами перетворювачів є напруга, струм, опір, ємність або індуктивність, то вторинними вимірювальними приладами є прилади для вимірювання відповідних електричних величин. При цьому, як правило, вторинні прилади електричних величин проградуйовані з урахуванням функції перетворення первинного вимірювального перетворювача в одиницях вимірюваної неелектричної величини.

Узагальнена структурна схема електричного приладу для вимірювань неелектричних величин наведена на рисунку 9.1.

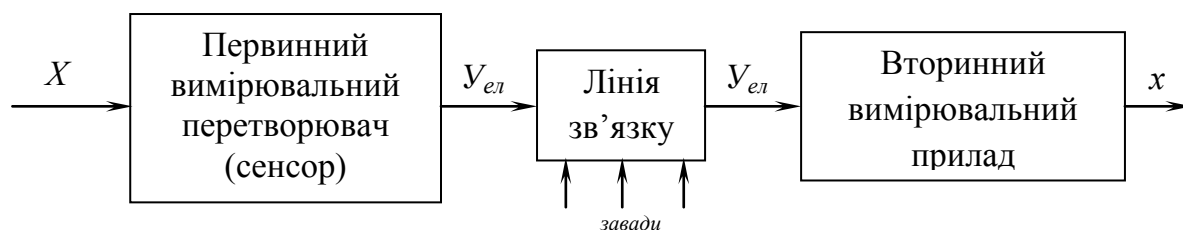


Рисунок 9.1 - Узагальнена структурна схема електричного приладу для вимірювань неелектричних величин

Вимірювана неелектрична величина X надходить на вхід первинного вимірювального перетворювача (сенсора) (ПВП), де перетворюється в пропорційну їй електричну величину $X_{ел}$, яка по лінії зв'язку (ЛЗ) подається на вторинний вимірювальний прилад (ВВП). На лінію зв'язку, довжина якої може бути досить значною, в загальному випадку, впливають завади, які можуть спотворити сигнал $X_{ел}$. Показ x ВВП, який визначений в одиницях вимірювальної величини X , може бути використаний для візуального спостереження або подальшого опрацювання у вимірювально-інформаційній системі.

Слід відзначити, що у ПВП фактично відбувається перетворення енергії одного виду (механічної, теплової, світлової) в іншу (електричну). Під час такого перетворення неелектричної величини реалізуються два принципи:

- вплив на електричні параметри ПВП – *пасивні ПВП*;
- генерування електричного сигналу – *активні ПВП*.

Для пасивних ПВП притаманна зміна електричного параметра перетворювача – електричного опору, ємності, індуктивності, через механічний контакт або використання фізичних залежностей. До таких ПВП, які мають назву *параметричні*, належать резистивні, ємнісні, індуктивні перетворювачі.

Для активних ПВП притаманна генерація активними елементами електричних сигналів – струм, напруга, заряд, при перетворенні механічної, теплової, світлової або хімічної енергії в електричну. До таких ПВП, які мають назву *генераторні*, належать термоелектричні, п'єзоелектричні, гальваномагнітні ПВП.

Висновок: вимірювання неелектричних величин фактично зводиться до вимірювання електричних величин: струму, напруги, ЕРС, опору, ємності, індуктивності, частоти, інтервалу часу, фази, з якими вимірювані неелектричні величини пов'язані відомими функціональними залежностями. Електричні величини вимірюють аналоговими і цифровими вторинними вимірювальними приладами. У ВВП над електричним сигналом може здійснюватись додаткові операції: підсилення до необхідного рівня, лінеаризація функції перетворення і корекція похибок ПВП та реєстрація. Важливою задачею при вимірюваннях неелектричних величин є передача інформації від ПВП до ВВП по лінії зв'язку, на яку впливають завади і можуть внести істотну похибку в результат вимірювання. В самій ЛЗ можуть відзначатись втрати вимірювальної інформації. При малих рівнях вихідних сигналів ПВП до складу приладу вводяться вимірювальні підсилювачі, які можуть бути суміщені з перетворювачами. При передачі сигналів на значні відстані (до десятків та до сотень кілометрів) використовуються телевимірювальні інформаційні системи.

9.2 Параметричні вимірювальні перетворювачі: резистивні; ємнісні; індуктивні перетворювачі

В параметричних вимірювальних перетворювачах неелектрична величина перетворюється у приріст параметра електричного кола (R, L, C, M), тому особливістю роботи таких перетворювачів є потреба в додатковому джерелі енергії.

Розглянемо основні типи параметричних вимірювальних перетворювачів.

Резистивні перетворювачі

Параметричні перетворювачі, в яких вихідною величиною є приріст електричного опору, мають назву *резистивні*. До цієї групи належать реостатні пе-

ретворювачі, перетворювачі контактного опору, тензорезистори, терморезистори, фоторезистори, магніторезистори, кондуктометричні (резистивні електрометричні) перетворювачі.

Реостатні перетворювачі – це перетворювачі, які виконані у вигляді реостата, повзунок якого переміщується під дією вхідної неелектричної величини – рисунок 9.2.

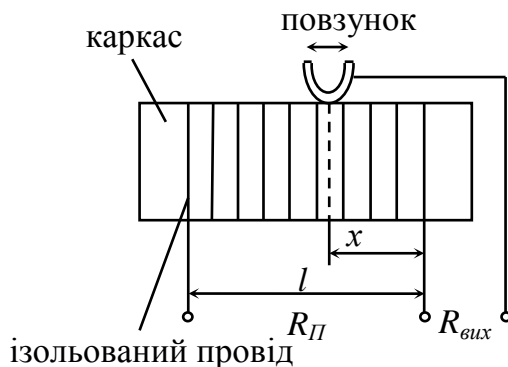


Рисунок 9.2 – Схема реостатного перетворювача

Вихідною величиною є електричний опір $R_{вих}$, значення якого зумовлене положенням повзунка. Реостатний перетворювач лінійних переміщень складається із стержневого, трубчатого або пластинчатого каркасу, на який намотаний з певним кроком манганіновий, константановий або вольфрамовий провід. Повзунок із фосфористої бронзи або платиноїридію переміщується по зачищеній від ізоляції та відполірованій контактній поверхні обмотки. Такі реостатні перетворювачі поступального руху та обертального руху є найпоширенішими. Якщо перетворювач працюватиме в умовах підвищених температур, то провід виконаний з нікель-хромового чи залізо-хромового сплаву.

Характеристика градування реостатного перетворювача лінійних переміщень має вигляд

$$R_{вих} = f(x) = \frac{R_{П}}{l} x, \quad (9.1)$$

де $R_{П}$ – повний опір перетворювача;

l – довжина перетворювача;

x – лінійне переміщення.

Найпоширеніші реостатні перетворювачі у пристроях для вимірювань лінійних і кутових переміщень та прискорень, а також рівня, сили, тиску та різниці тиску, так як їх можна попередньо перетворити в переміщення.

Перетворювачі контактного опору побудовані на залежності перехідного опору між стиковими електропровідними елементами від зусиль їх стискання або деформації - рисунок 9.3.

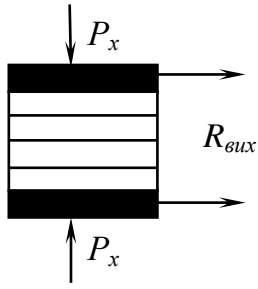


Рисунок 9.3 – Схема перетворювача контактної опору

Як електропровідні елементи для таких перетворювачів використовують електропровідний папір, гуму та інші електропровідні матеріали з питомим об'ємним опором $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, оскільки перехідний опір набагато більший за об'ємний опір контактних елементів. Одним з перших представників таких перетворювачів став вугільний мікрофон.

Характеристика градування перетворювача контактної опору має вигляд

$$R_{вих} = R_0 \cdot \left(1 + \frac{k}{P_x} \right), \quad (9.2)$$

де k – коефіцієнт перетворення.

Тензорезистори (тензометричні перетворювачі) – це параметричні перетворювачі, принцип дії яких оснований на явищі тензоефекту. Суть тензоефекту полягає в зміні активного опору провідників і напівпровідників при їх механічній деформації. Отже, входною величиною тензорезистора є відносна, ε_l , або абсолютна, Δl , деформація, а вихідною – відносна, ε_R , або абсолютна, ΔR , зміна опору тензорезистора, які пов'язані між собою *коефіцієнтом тензочутливості* $k = \varepsilon_R / \varepsilon_l$. Як відомо, опір R провідника залежить від його довжини l , площі поперечного перерізу S і питомого опору r згідно формулою

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}. \quad (9.3)$$

Під дією зовнішніх навантажень провідник деформується у межах пружної деформації, як наслідок, змінюються геометричні розміри l та S , а також структура матеріалу, зміна якої призводить до зміни r . Все це призводить до зміни опору провідника R на величину ΔR , яка, в остаточному результаті, є функцією його деформації

$$\Delta R = \frac{k \cdot R}{l} \cdot \Delta l. \quad (9.4)$$

Широко застосовуються нині дротяні та фольгові тензорезистори, які наклеюються на об'єкт дослідження, так щоб вони разом із ним зазнавали деформації стискання або розтягування.

Дротовий тензорезистор має підкладку з тонкого паперу чи лакової плівки, на котру наклеєний тензочутливий елемент – тонкий дріт. До кінців дроту приєднані зварюваннями виводи з тонкого мідного дроту. Зверху перетворювач покрито шаром лаку - рисунок 9.4.

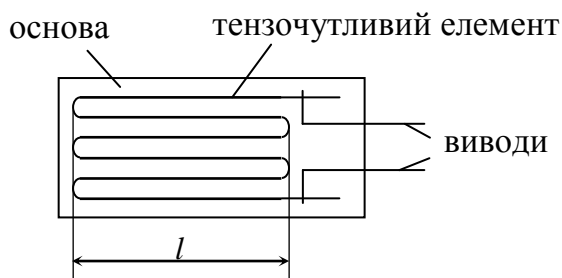


Рисунок 9.4 – Схема дротяного тензорезистора



Рисунок 9.5 – Схема фольгового тензорезистора

Фольговий тензорезистор містить тонку стрічку з фольги завтовшки 0,01...0,02 мм, на якій частина матеріалу вибрана так, що її частина, яка залишилась, утворює плоску решітку з виводами. Цю решітку закріплюють між двома плівками з лаку - рисунок 9.5.

Поширені плівкові тензорезистори, в яких чутливий елемент нанесений методом вакуумної сублімації з подальшою конденсацією на плівку. Для виготовлення плівкових тензорезисторів застосовують як металеві (титано-алюмінієвий сплав), так й напівпровідникові (германій, кремній) матеріали.

Важливою перевагою як фольгових, так і плівкових тензорезисторів є те, що під час виготовлення можливо передбачити будь-який рисунок їх решітки, завдяки чому їх застосовують для досліджень механічних напружень деталей різної конфігурації.

Принципово нові можливості у розвитку тензорезисторів на основі напівпровідникових чутливих елементів відкрилися з розробкою і дослідженням структур типу «кремній на діелектрику». Із них найбільш вивчена і технологічно освоєна структура «кремній на сапфірі». Це тонка монокристалічна плівка кремнію, вирощена на монокристалічній сапфіровій підкладці з певною кристалографічною орієнтацією. Такі перетворювачі мають хороші пружні властивості, малу похибку гістерезису, широкий діапазон вимірюваних деформацій.

Тензорезистори всіх типів широко застосовуються при вимірюванні деформацій, зусиль, тисків та механічних моментів.

Терморезистори – це теплові параметричні перетворювачі, принцип дії яких оснований на властивості речовини змінювати свій опір при зміні температури. Для вимірювання температури терморезистор необхідно помістити в середовище, температуру якого необхідно виміряти. Чутливими елементами таких перетворювачів є провідники та напівпровідники. Перетворювачі з провід-

никовими чутливими елементами мають назву *термометри опору* і матеріалами для їх виготовлення є платина, мідь та нікель. Існують термометри опору трьох типів: термоопори платинові (ТОП), термоопори мідні (ТОМ) і термоопори нікелеві (ТОН).

Конструктивно ТОП – це перетворювач, чутливий елемент, якого виконаний зі стрічкової платини, навитої на трубчастий ізоляційний каркас із спеціального скла. Для захисту від механічних пошкоджень перетворювач покритий захисною оболонкою.

Конструктивно ТОМ – це перетворювач, чутливий елемент якого виконаний як безкаркасна обмотка з мідного ізольованого дроту та зверху покрита фторопластовою плівкою. Для забезпечення потрібної механічної міцності обмотку поміщають у тонкостінну металеву гільзу та засипають керамічним порошком і герметизують.

Характеристика градування для терморезисторів має вигляд

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T_{\text{середовища}}), \quad (9.5)$$

де R_0 – опір чутливого елемента при температурі 0°C , Ом;

α – температурний коефіцієнт опору, $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$.

Термоопори платинові використовуються в діапазоні температур від 0°C до плюс 1100°C , термоопори мідні - від плюс 50°C до плюс 250°C , термоопори нікелеві - від мінус 60°C до плюс 180°C .

Чутливий елемент напівпровідникового терморезистора – *термістора* виготовляється з окислів різних металів: міді, кобальту, марганцю. Із збільшенням температури середовища опір термісторів зменшується, а характеристика градування має вигляд

$$R_t = A e^{\frac{B}{T}}, \quad (9.6)$$

де A, B – сталі коефіцієнти, які залежать від матеріалу і технології виготовлення термістора.

Термістори використовуються в діапазоні температур від мінус 200°C до плюс 600°C . Їх чутливість у 5...10 разів перевищує чутливість металевих терморезисторів, але до недоліків належать не лінійність характеристики градування, великий розкид параметрів при вимірюваннях, а також старіння і нестабільність параметрів у часі.

Фоторезистори – це фотоелектричні параметричні перетворювачі, принцип дії яких оснований на явищі внутрішнього фотоефекту. Суть внутрішнього фотоефекту полягає у переміщенні звільнених під дією світлового потоку носіїв заряду (електронів і дірок) усередині твердого тіла (без виходу назовні), що

призводить до зміні електропровідності тіла. За конструкцією фоторезистор містить нанесений на скляну пластину, виготовлену із селеніду кадмію, сірчаного свинцю, сірчаного кадмію, та яка має площу від одиниць до сотень квадратних міліметрів, шар напівпровідника з електродами, що входять у нього.

Характеристика градування фоторезисторів має вигляд

$$G = \Phi \cdot a, \quad (9.7)$$

де G – електропровідність;

Φ – світловий потік;

a – коефіцієнт не лінійності енергетичної характеристики фотопровідності.

Висока чутливість, можливість одержання значних фотострумів без застосування додаткових підсилювачів і практично необмежений строк служби визначають основну перевагу фоторезисторів. До недоліків цих перетворювачів слід віднести їх інерційність.

Кондуктометричні (резистивні електрометричні) перетворювачі – це електрохімічні параметричні перетворювачі, які базуються на використанні залежності їх опору від складу і концентрації електроліту за виразом

$$R = \frac{K_r}{\gamma}, \quad (9.8)$$

де K_r – коефіцієнт перетворення, що залежить від співвідношення геометричних розмірів;

γ – провідність електроліту.

Кондуктометричні перетворювачі використовуються для вимірювання питомої електропровідності електролітів для визначення концентрації розчинів. Чутливими елементами є два електроди, які занурені в електроліт, опір між ними залежить від концентрації розчину. Для зменшення похибки від поляризації і забруднення електродів застосовуються чотириелектродні кондуктометричні перетворювачі з двома струмовими 1 і двома потенціальними 2 виводами, з яких знімається напруга – рисунок 9.6.

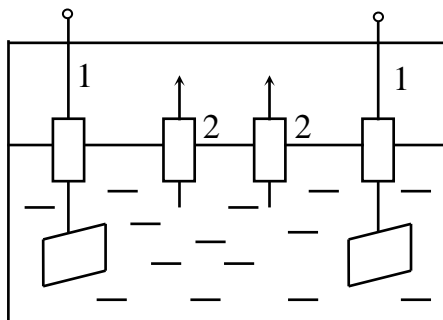


Рисунок 9.6 – Схема чотириелектродного кондуктометричного перетворювача

Крім визначення концентрації електролітів кондуктометричні перетворювачі застосовуються для вимірювання механічних переміщень і деформацій, а також вологості газів та деревини.

Ємнісні перетворювачі – це електричні конденсатори, ємність яких змінюється внаслідок зміни під дією вимірюваної неелектричної величини відстані між електродами, площі перекриття електродів або діелектричної проникності середовища, що міститься між електродами. В ідеальному випадку ємність плоского конденсатора визначається за виразом

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d}, \quad (9.9)$$

де ε_0 – діелектрична стала; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

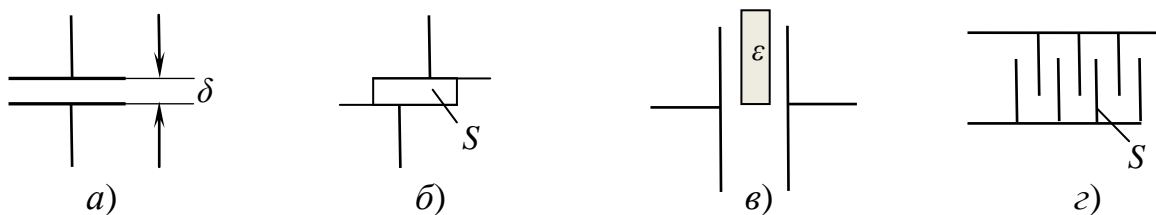
ε – відносна діелектрична проникність;

S – площа електродів;

d – відстань між електродами.

Аналіз виразу (9.9) показує, що ємність плоского конденсатора прямо пропорційно залежить від відносної діелектричної проникності середовища та зворотно пропорційно залежить від відстані між електродами..

Рисунок 9.7 пояснює принцип побудови ємнісних перетворювачів.



a - перетворювач зі зміною відстані між пластинами конденсатора;

б та *в* - перетворювачі зі зміною площі перекриття між електродами конденсатора;

г - перетворювач зі зміною діелектричної проникності між електродами

Рисунок 9.7 – Схеми ємнісних перетворювачів

Тому то, всі фізичні величини, які безпосередньо або через допоміжні чинники будуть впливати на зміни величин ε , S та d , можна виміряти за допомогою ємнісних перетворювачів

Розглянемо, перетворювачем яких фізичних величин може бути ємнісний перетворювач:

- *зміна діелектричної проникності ε .*

Величина ε має різні значення для різних речовин. Отже, цю особливість можна використовувати для визначення виду речовини, що знаходиться між електродами ємнісного перетворювача. Якщо є суміш двох речовин, значення ε_1 і ε_2 яких відомі, то, вимірюючи значення суміші ε_C , можна визначити її

процентний склад. Наприклад, відносна діелектрична проникність нафти $\epsilon_{\text{нафти}} = 3$, а води $\epsilon_{\text{води}} = 81$. Отже, найменші домішки води у нафті будуть різко збільшувати загальну діелектричну проникність ϵ_C . На цій особливості ґрунтується будова ємнісних вимірювачів вологості. Загалом міжелектродний простір може бути тільки частково заповнений якою-небудь твердою, сипкою або рідкою речовиною. Якщо відома діелектрична проникність цієї речовини, то за величиною вимірної ємності можна визначити ступінь заповнення міжелектродного простору в лінійних мірах площі. На цій основі побудовані вимірювачі переміщення (твердих) або рівнів (сипкого і рідкого) середовищ у закритих, недоступних для безпосереднього спостереження резервуарах;

- зміна площі S електродів.

Площа електродів S може змінюватись або при лінійних переміщеннях однієї з пластин відносно іншої, або при їх відносному повертанні. Таким чином, на цій основі створені ємнісні перетворювачі лінійних і кутових переміщень. Пластини можуть мати значні розміри, до 100 мм, складатись із спарених секцій, тому то ємнісні перетворювачі такого типу придатні для вимірювання порівняно великих переміщень і кутів від 0 до 360°. Якщо ємнісний перетворювач виконати так, що вільному відносному лінійному або кутовому переміщенню пластин будуть перешкоджати відповідні пружини із наперед заданими характеристиками, то він буде придатний для вимірювання сил чи моментів, що їх обертають;

- зміна відстані d між електродами. Таку відстань називають зазором, а ємність перетворювача змінюється обернено пропорційно зазору d . На рисунку 9.8 наведена схема ємнісного перетворювача зі зміною зазору між електродами.

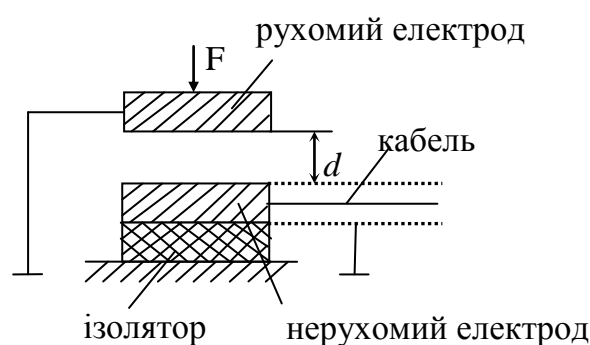


Рисунок 9.8 – Схема ємнісного перетворювача

Характеристика градування ємнісного перетворювача має вигляд

$$C = f(d) = \epsilon_0 \epsilon \cdot S \cdot \frac{1}{d}. \quad (9.10)$$

Ємнісні перетворювачі використовуються для вимірювання лінійних та кутових переміщень, рівня рідини, вологості сипких матеріалів, а сумісно з еле-

ктромеханічними перетворювачами – для вимірювання тиску, сили, прискорення та вібрацій.

Індуктивні перетворювачі – це котушка індуктивності з феромагнітним осердям (дроселем), повний опір якої змінюється при взаємному відносному переміщенні елементів магнітопроводу. Індуктивність котушки L пов'язана з зазором δ , тобто з довжиною повітряного проміжку між рухомою і нерухомою частинами магнітопроводу, і ефективною площею S повітряного проміжку залежністю

$$L = \frac{w^2}{R_M} = \frac{w^2}{R_{M..m} + \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot S}}, \quad (9.11)$$

де R_M – повний магнітний опір кола;

w – кількість витків котушки;

$R_{M..m}$ – магнітний опір магнітопроводу;

μ_0 – магнітна стала; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

На рисунку 9.9 наведена схема індуктивного перетворювача із зміною розміру повітряного зазору.

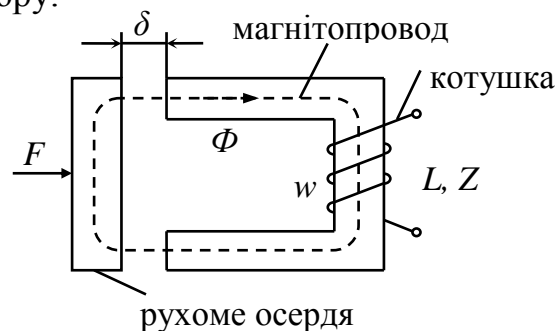


Рисунок 9.9 - Схема індуктивного перетворювача із зміною розміру повітряного зазору

Вихідною величиною індуктивного перетворювача є зміна індуктивності L котушки. Вхідною величиною перетворювача є переміщення рухомого осердя, яке може виникати із-за дії неелектричної величини: сили, тиску, яке й призводить до зміни її повного опору Z . Індуктивний перетворювач є нелінійним перетворювачем, так як залежність індуктивності від довжини зазору близька до гіперболічної. Значне покращення лінійності при одночасному збільшенні чутливості досягається в диференціальних перетворювачах із двома перетворювальними елементами, що мають загальну рухому частину – рисунок 9.10.

В такому перетворювачі рухомий якір розміщений симетрично відносно обох осердь із початковим зазором δ . Магнітні опори для потоків, що створюю-

ються двома котушками, є однаковими. Зміни магнітних опорів, що відбуваються при переміщенні $\Delta\delta$ якоря, мають протилежні знаки.

При зустрічно-послідовному вмиканні їх сумарна індуктивність дорівнює

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \omega^2 \cdot S}{\delta - \Delta\delta} - \frac{\mu_0 \cdot \omega^2 \cdot S}{\delta + \Delta\delta} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega^2 \cdot S \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^2}. \quad (9.12)$$

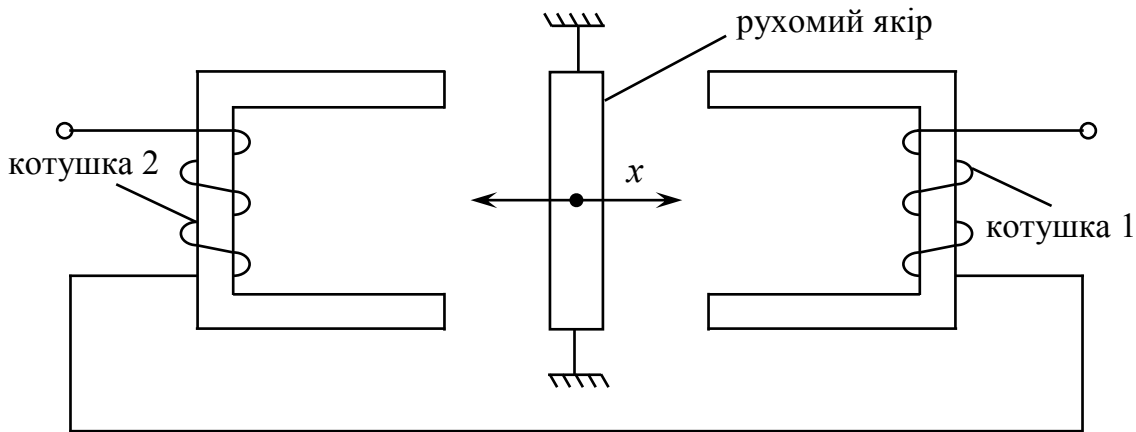


Рисунок 9.10 – Схема диференціального індуктивного перетворювача

Внаслідок того, що в знаменнику виразу (9.12) відношення $\Delta\delta/\delta$ знаходиться у квадраті, отже в диференціальному перетворювачі лінійність характеристики забезпечується в більш широких межах. Через це практично всі індуктивні перетворювачі виконуються диференціальними.

9.3 Генераторні вимірювальні перетворювачі: індукційні; п'єзоелектричні; трансформаторні; магнітопружні; електретні; термоелектричні; фотоелектричні перетворювачі

Генераторні вимірювальні перетворювачі – це первинні вимірювальні перетворювачі, в яких вхідна неелектрична величина перетворюється у вихідний сигнал, який має енергетичні властивості.

Розглянемо основні типи генераторних вимірювальних перетворювачів.

Принцип роботи таких перетворювачів ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції. Такі перетворювачі містять постійний магніт, між полюсами якого розташована рухома вимірювальна котушка – рисунок 9.11. При лінійних або кутових переміщеннях вимірювальної котушки в магнітному полі в ній наводиться ЕРС, яка є функцією кута повороту α котушки

$$e = -B_s \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} \quad \text{або} \quad e = -B_s \cdot S_p \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \quad (9.13)$$

де B_z – індукція в робочому зазорі;

l – активна довжина вимірювальної котушки;

x, α – переміщення відповідно лінійне або кутове;

S_p – активна площа рамки.

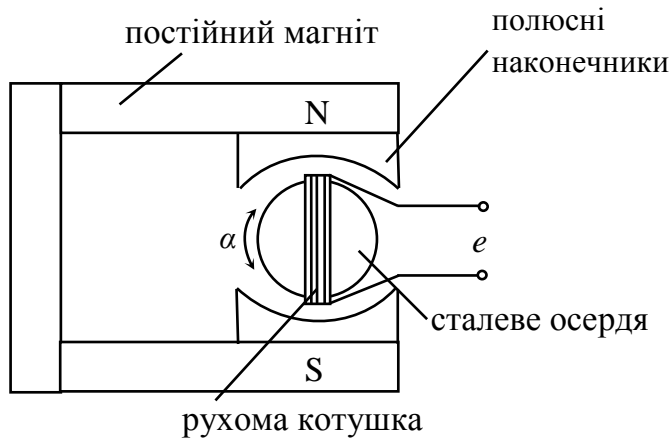


Рисунок 9.11 – Схема індукційного перетворювача

Індукційні перетворювачі використовуються для вимірювання лінійної і кутової швидкостей, а також інших величин, функціонально пов'язаних із ними. Перетворювачі цього типу, які призначені для вимірювання кутової швидкості і виконані у вигляді невеликих генераторів постійного чи змінного струмів, мають назву *тахогенератори*.

П'єзоелектричні перетворювачі – це перетворювачі, принцип дії яких оснований на явищах прямого та зворотного п'єзоефектів. Суть прямого п'єзоефекту полягає в електризації кристалів деяких діелектриків під дією механічних напружень, а зворотного ефекту - у виникненні механічної деформації кристала під дією електричного поля. До матеріалів, яким властивий п'єзоефект, належать кварц, сегнетова сіль, а також п'єзокераміка: титанат барію та цирконат свинцю.

На рисунку 9.12 наведена схема п'єзоелектричного перетворювача.

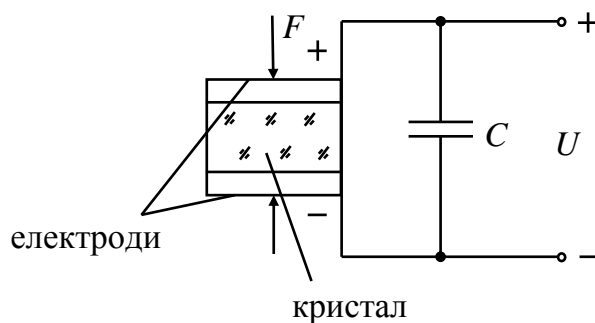


Рисунок 9.12 – Схема п'єзоелектричного перетворювача

Якщо на п'єзокристал діяти силою F , то на його гранях з'явиться заряд q , який пропорційний силі F

$$q = d_{11} \cdot F, \quad (9.14)$$

де d_{11} – п'єзоелектричний модуль, який залежить від матеріалу та його стану.

П'єзокристал разом з електродами утворюють конденсатор, ЕРС якого дорівнює

$$E = \frac{q}{C} = \frac{d_{11}}{C} \cdot F. \quad (9.15)$$

Вхідною величиною для п'єзоелектричного перетворювача є механічна сила, а вихідною – ЕРС. Характеристика градування п'єзоелектричного перетворювача має вигляд

$$U = f(F) = \frac{d_{11}}{C} \cdot F. \quad (9.16)$$

Головні переваги таких перетворювачів: малі габарити, висока надійність, простота конструкції, можливість вимірювати параметри, що швидко змінюються.

Недоліком п'єзоелектричного перетворювача є значні похибки під час вимірювання сталої сили, оскільки заряд, що з'явився на гранях п'єзокристалу, може стікати через вхідний опір вторинного приладу, тому то п'єзоелектричні перетворювачі доцільно застосовувати для вимірювання змінної сили.

Трансформаторні перетворювачі – це генераторні перетворювачі трансформаторного типу, у яких під дією вхідної величини змінюється взаємна індуктивність між його обмотками, що призводить до зміни вихідної напруги - рисунок 9.13.

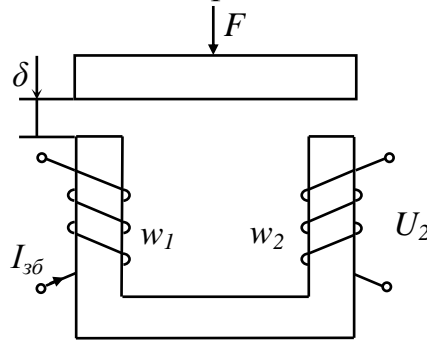


Рисунок 9.13 – Схема трансформаторного перетворювача

Принцип дії таких перетворювачів ґрунтується на залежності взаємоіндуктивності M між обмотками з кількістю витків w_1 і w_2 від магнітного опору R_M , який є функцією довжини повітряного проміжку δ . Величина M дорівнює

$$M = \frac{W_1 \cdot W_2}{R_M} \quad (9.17)$$

Вихідна напруга U_2 перетворювача визначається за формулою

$$U_2 = f(\delta) = \omega \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot I_{зб} \cdot \frac{1}{2\delta}. \quad (9.18)$$

де $I_{зб}$ - струм збурення.

Магнітопружний перетворювач – це феромагнітне осердя з однією або з двома обмотками, до якого прикладене механічне зусилля F – рисунок 9.14.

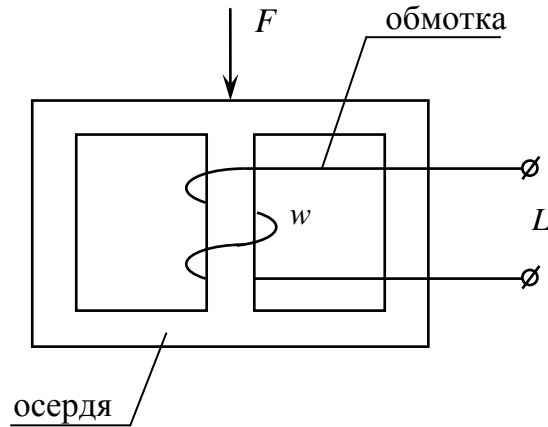


Рисунок 9.14 – Схема магнітопружного перетворювача

Це зусилля створює в осерді механічне напруження σ , яке призводить до зміни магнітної проникності μ і, відповідно, до зміни індуктивності L котушки індуктивності. Принцип дії таких перетворювачів оснований на явищі *магнітопружного ефекту*, суть якого полягає в зміні магнітної проникності під дією механічної пружної деформації. Якщо на намагнічене феромагнітне тіло діє зовнішня механічна сила F , то тіло деформується, домени змінюють свою орієнтацію і індукція у матеріалі змінюється. Явище має пружний характер – якщо силу зняти, то індукція B набуде попереднє значення. Якщо значення напруженості магнітного поля H стало, зміна індукції еквівалентна зміні магнітної проникності μ , оскільки $\mu = \frac{B}{H}$.

Основною характеристикою феромагнітного матеріалу, з погляду його магнітопружних властивостей, є *коефіцієнт магнітопружної чутливості* k_σ , який визначається як відношення відносної зміни магнітної проникності $\Delta\mu/\mu$ до відносної деформації $\Delta l/l$ феромагнітного тіла або механічного напруження σ . Отже, у магнітопружному перетворювачі відбуваються такі перетворення

$$F \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_M \rightarrow L, \quad (9.19)$$

де R_M – магнітний опір, Ом.

Матеріал для виготовлення магнітопружних перетворювачів – це електротехнічні сталі і пермалой. Магнітопружні перетворювачі використовуються для вимірювань великих сил ($10^5 \dots 10^6$ МПа), тисків та обертальних моментів.

Електрет – це постійний наелектризований діелектрик із різнойменними полюсами, що має зовнішнє електричне поле, який тривало зберігає поляризацію після віддалення зовнішнього електричного поля і створює в навколишньому просторі електричне поле – рисунок 9.15.

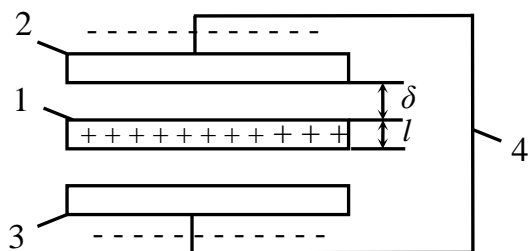


Рисунок 9.15 – Схема електретного перетворювача

Якщо електрет 1 розміщено між металевими пластинами 2 і 3, з'єднаними провідником 4, то на металевих електродах буде виникати наведений заряд, густина якого визначається за виразом

$$\sigma_u = \varepsilon_0 \cdot E = \frac{\sigma}{1 + \frac{\varepsilon \cdot S}{\varepsilon_0 \cdot l}}, \quad (9.20)$$

де δ - густина електричного заряду;

ε - діелектрична проникність;

l - товщина електрета;

S - площа матеріалу електрета;

E - напруга електричного поля, що створюється електретом.

Коли один із електретів коливається, то наведений на ньому заряд буде змінюватись і по зовнішньому колу протікає струм, який дорівнює

$$i = S \cdot \frac{d\sigma_u}{dt}. \quad (9.21)$$

Електретні перетворювачі можуть використовуватись для вимірювання параметрів вібрацій (електретний мікрофон, телефон), але більше застосування вони знайшли для перетворення тиску навколишнього повітря. Недолік електретних перетворювачів полягає в тому, що вони зазнають впливу температури. При нагріванні електрет втрачає внутрішню поляризацію і поверхневий заряд. Основним фактором, що ускладнює практичне застосування електретів, є складність одержання двох або кількох електретів із різною поверхневою густиною зарядів. І, зрештою, поверхнева густина заряду змінюється в часі, отже, елект-

ричне поле поза електретом нестабільне. У той самий час електрет має низьку вартість і просту конструкцію.

Принцип дії термоелектричних перетворювачів оснований на явищі термоелектричного ефекту Зеебека, суть якого полягає у виникненні термо-ЕРС у колі, що містить два різнорідних провідника або напівпровідника, які мають назву *термоелектроди*, якщо температура місця з'єднання електродів (робочий кінець перетворювача) і температура вільних (холодних) кінців неоднакові. Чутливий елемент термоелектричного перетворювача, тобто пару термоелектродів, називають *термопарою*.

Матеріалами термоелектродів термопар є сплави хромелю, копелю, алюмелю, вольфрамренію, платинородію, а також платина, мідь і залізо. Від назви теромелектродів походить назва самого термоперетворювача, наприклад, перетворювач типу ТХА має електроди з хромелю та алюмелю.

Термоперетворювачі застосовують для вимірювання температур у межах від мінус 270°C до плюс 2200°C – таблиця 9.1.

Таблиця 9.1 – Типи термопар

| Тип термопари | Матеріали термоелектродів | Діапазон вимірювання, $^{\circ}\text{C}$ |
|---------------|---------------------------|--|
| ТХА | Хромель – Алюмель | мінус 270...плюс 1000 |
| ТХК | Хромель – Копель | мінус 200...плюс 600 |
| ТПП | Платинородій | мінус 50...плюс 1700 |
| ТВР | Вольфрам - реній | 0...плюс 2200 |

В основу будови генераторних фотоелектричних перетворювачів покладено явище зовнішнього фотоэффекту. Суть зовнішнього фотоэффекту полягає в емісії (випусканні) електронів на поверхні фотокатода у вакуум під дією світлового потоку. Кванти світла, що досягають фото чутливої поверхні катода, викликають емісію фотоелектронів, які під дією зовнішнього електричного поля створюють фотострум. На цьому принципі *побудовані електровакуумні фотоелементи, іонні фотоелементи та фотоелектричні помножувачі*.

Електровакуумний (електронний або іонний) фотоелемент є діодом, у якого на внутрішню поверхню скляного балону нанесено фотокатод у вигляді тонкого шару речовини, з якого відбувається фотоemisія. Анодом є металеве кільце, що не заважає світлу потрапляти на фотокатод. В електронних фотоелементах створено високий вакуум, а в іонних знаходиться інертний газ, наприклад, аргон, під тиском в декілька сотень Па. Катоди застосовуються сур`мяно-цезієві або срібно-киснево-цезієві.

Характеристика градування електровакуумного фотоелемента має вигляд

$$I_{\phi} = f(\Phi_C) = S_{int} \cdot \Phi_C, \quad (9.22)$$

де I_{ϕ} – фотострум, mA ;

Φ_C – світловий потік, $лм$;

S_{int} – інтегральна чутливість фотокатода, $mA/лм$.

Фотоелектронні помножувачі є електровакуумними приладами, в яких електронний фотоелемент доповнений пристроєм для підсилення фотоструму за рахунок вторинної фотоелектронної емісії. Суть явища вторинної електронної емісії міститься у процесі виходу електронів з поверхні твердих або рідини при бомбардуванні їх поверхні первинними електронами. Тому то в такому перетворювачі, крім основного катоду K , є декілька вторинних катодів $K_1 \dots K_n$, які знаходяться під різними потенціалами, внаслідок чого, струм підсилюється у декілька сотень тисяч раз – рисунок 9.17.

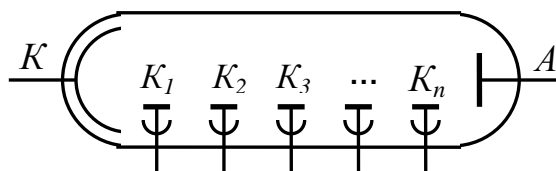


Рисунок 9.17 – Схема фотоелектричного помножувача

Фотоелектронні помножувачі мають малу інерційність і можуть працювати на досить високих частотах. Їх застосовують для реєстрації світлових імпульсів, що надходять через наносекундні проміжки часу, в астрономії, фототелеграфії і телебаченні, для вимірювання малих світлових потоків, для спектрального аналізу.

9.4 Методи та засоби вимірювання температури

Температуру вимірюють безконтактним і контактним методами.

Безконтактним методом температуру досліджуваного об'єкта визначають на основі вимірювань параметрів їх теплового випромінювання. Вимірювання здійснюються дистанційно (безконтактно), за допомогою вимірювальних приладів – *пірометрів*.

За *контактним методом* безпосередньо у середовище, температуру якого вимірюють, поміщають тепловий первинний вимірювальний перетворювач, вихідна величина якого є функцією температури. У якості теплового первинного вимірювального перетворювача у контактних електричних термометрах використовують термоелектричні перетворювачі та термоопори (ТО). Під'єднання термоопорів до вимірювального кола за допомогою з'єднувальних проводів з опором R_L може суттєво вплинути на точність вимірювання темпе-

ратури. Існують дво-, три- та чотири провідні схеми під'єднання термоопорі до вимірювального приладу.

Вимірюючи температуру із застосуванням термоопорів, потрібно врахувати можливість появи додаткових похибок, які виникають від нагрівання їх вимірювальним струмом. Щоб згадані похибки були незначними, значення вимірювального струму повинно бути таким, щоб зміна опору не перевищувала 0,1%. Як вторинні прилади у комплекті з терморезистивними перетворювачами використовують мостові кола: зрівноважені та незрівноважені автоматичні мости, а також логометри та цифрові вимірювальні прилади. На рисунку 9.18 наведена схема автоматичного моста для вимірювання температури. ТО вмикається в плече моста, яке прилягає до реохорда як наслідок, зміна опору реохорда буде пропорційна до зміни опору ТО, яка зумовлена зміною вимірюваної температури

$$\Delta R_p = \Delta R_T \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (9.23)$$

Незрівноважені мости застосовують у пристроях вимірювання температури рідше, ніж зрівноважені – рисунок 9.19.

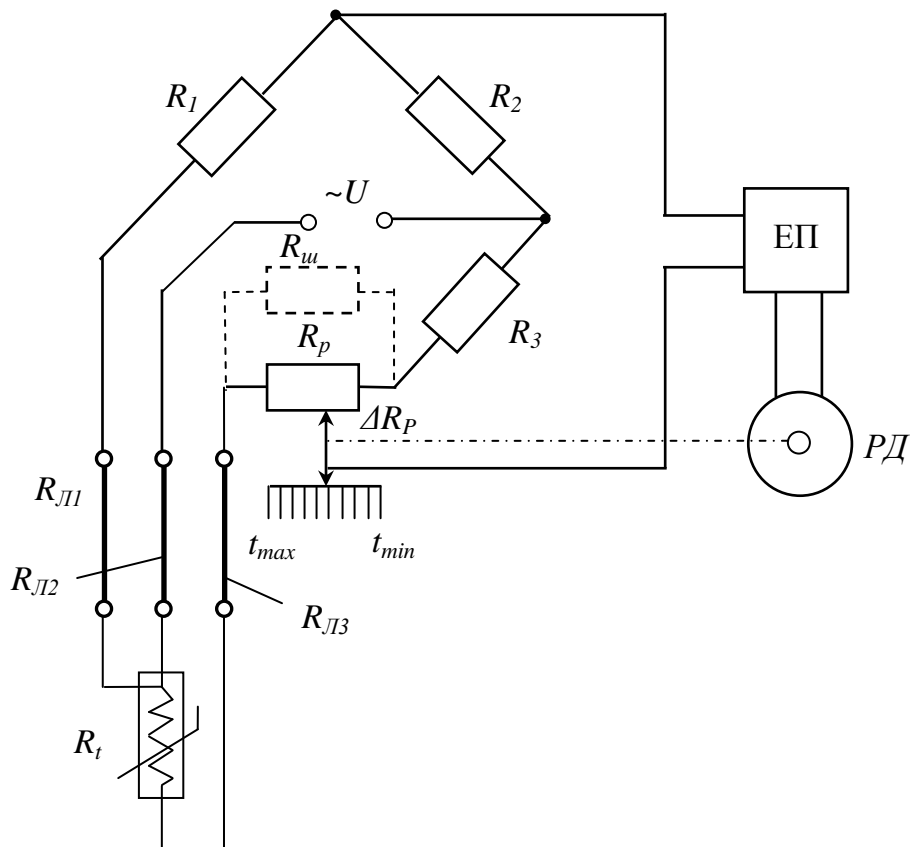


Рисунок 9.18 - Схема автоматичного моста для вимірювання температури

До недоліків незрівноважених мостів належать не лінійність їх функцій перетворення, залежність вихідної напруги від напруги джерела живлення.

Проте через їх виняткову простоту за наявності стабілізованих джерел напруги незрівноважені мости використовують для вимірювання температур у вузькому температурному діапазоні, коли не лінійністю функцій перетворення незрівноваженого моста можна знехтувати або зробити прилад з нелінійною шкалою.

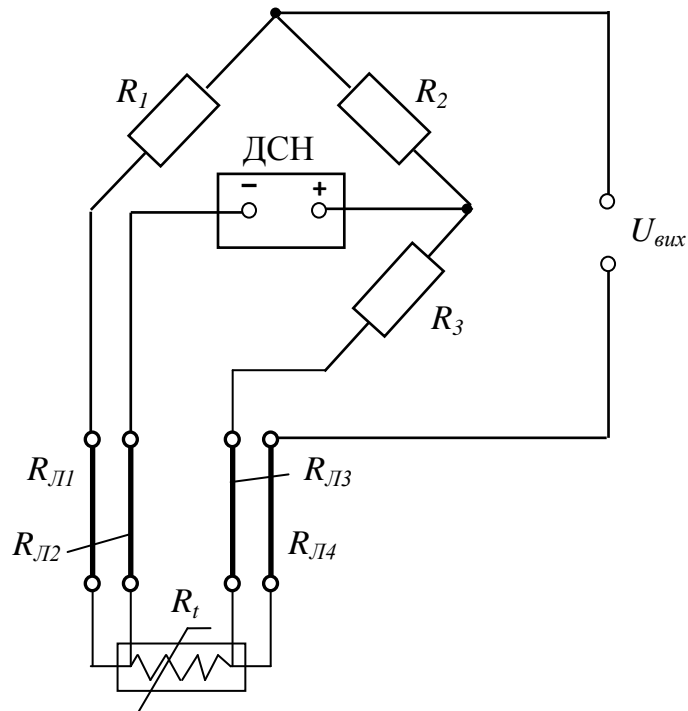


Рисунок 9.19 – Схема неврівноваженого моста для вимірювання температури

Сучасні автоматичні мости мають класи точності 0,25; 0,5; 1,0, які виражені у вигляді допустимої основної зведеної похибки, яка дорівнює

$$\gamma_{zp} = \pm \frac{\Delta R_{zp}}{R_{норм}} \cdot 100\% , \quad (9.24)$$

де ΔR_{zp} - граничне значення основної абсолютної похибки, Ом;

$R_{норм}$ - нормоване значення опору термоперетворювача, Ом.

$$R_{норм} = R_{\Theta_K} - R_{\Theta_{П}}, \quad (9.25)$$

де R_{Θ_K} – опір термоперетворювача опору, що відповідає кінцевій Θ_K температурі з діапазону вимірювань моста, Ом;

$R_{\Theta_{П}}$ – опір термоперетворювача опору, що відповідає початковій температурі $\Theta_{П}$ з діапазону вимірювань моста, Ом.

Метрологічні характеристики деяких автоматичних мостів, призначених для вимірювань температури у комплекті з терморезистивними перетворювачами опору, наведено в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2 - Метрологічні характеристики автоматичних мостів та цифрових приладів для вимірювання температури у комплекті з термоперетворювачами опору

| Назва приладу | Тип приладу | Тип ПВП | Діапазон вимірювань, °C | Клас точності | Дискретність показів, °C |
|-------------------------------|-------------|---------|-------------------------|---------------|--------------------------|
| Автоматичний міст | КСМ2 | ТОМ | 0...100 | 0,5 | - |
| | КСМ4 | ТОП | 0...500 | 0,25 | - |
| Цифровий вимірювальний прилад | A566 | ТОП | -50...1000 | 0,25/0,2 | 0,1 |
| | ЦР7701-05 | ТОМ | -200...200 | 0,1/0,05 | 0,1 |

Розглянемо теоретичні положення щодо визначення похибок вимірювання температури терморезистивними термометрами. Похибка $\Delta\Theta_x$ вимірювання температури Θ_x за допомогою термоперетворювача опору та вторинного приладу (автоматичного моста або цифрового вимірювального приладу) має такі складові

$$\Delta\Theta_x = \Delta\Theta_{TO} + \Delta\Theta_{ВП}, \quad (9.26)$$

де $\Delta\Theta_{TO}, \Delta\Theta_{ВП}$ - відповідно похибки термоперетворювача опору та вторинного приладу, °C.

Похибка $\Delta\Theta_{TO}$ має дві складові – інструментальну і методичну.

Граничне значення $\Delta\Theta_{TO.зр}$ основної інструментальної похибки термоперетворювача опору, зумовлене відхиленням його дійсної статичної характеристики перетворення від номінальних статичних характеристик перетворення (НСХП), які наведені в таблиці 9.3.

Похибка $\Delta\Theta_{ВП}$ показу вторинного приладу складається з його основної та додаткових інструментальних похибок.

При використанні автоматичного моста граничне значення його основної похибки розраховується за формулою

$$\Delta\Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\Delta R_{зр}}{S_{TO}}, \quad (9.27)$$

де $\Delta R_{зр}$ - допустиме значення основної абсолютної похибки моста, Ом;

S_{TO} - чутливість термоперетворювача опору, Ом/°C.

Допустима основна зведена похибка моста дорівнює

$$\gamma_{ep} = \pm \frac{\Delta R_{ep}}{R_{норм}} \cdot 100\% . \quad (9.28)$$

Таблиця 9.3 - Границі допустимих відхилень характеристик перетворення термоперетворювачів опору від НСХП

| Тип перетворювача | Клас допуску | Діапазон температур, °C | Границі допустимих відхилень від НСХП, $\pm \Delta\Theta_{ТО.зр}$, °C |
|-------------------|--------------|-------------------------|--|
| Платиновий (ТОП) | А | -260...-250 | 3,0 |
| | | -250...-200 | 1,0 |
| | | -200...+750 | $0,15 + 0,02 \cdot \Theta $ |
| | В | -200...+1100 | $0,4 + 0,005 \cdot \Theta $ |
| | С | -100...+1100 | $0,6 + 0,008 \cdot \Theta $ |
| Мідний (ТОМ) | В | -200...+200 | $0,25 + 0,0035 \cdot \Theta $ |
| | С | -200...+200 | $0,5 + 0,0065 \cdot \Theta $ |

При використанні цифрового вторинного приладу граничне значення його основної похибки $\Delta\Theta_{ВП.зр}$ визначають за формулою

$$\Delta\Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\delta_{\Theta.зр} \cdot \Theta_X}{100} . \quad (9.29)$$

Приклад 9.1 Оцінити похибку вимірювання температури $\Theta_X = 700$ °C за допомогою цифрового вимірювального приладу типу ЦР7701-05 класу точності 0,1/0,05 з діапазоном вимірювання від мінус 50 °C до плюс 1000 °C, який працює в комплекті з платиновим термоперетворювачем опору класом допуску В.

Розв'язання 1. Граничне значення похибки термоперетворювача опору ТСП класу допуску В при температурі 700 °C визначаємо за формулою

$$\Delta\Theta_{ТО.зр} = \pm(0,4 + 0,005 \cdot |\Theta_X|) = \pm(0,4 + 0,005 \cdot 700) = \pm 3,9^{\circ}C .$$

2. Граничне значення похибки $\Delta\Theta_{ВП.зр}$ цифрового приладу обчислюємо

$$\delta_{ВП.зр} = \pm \left[c + d \left(\frac{\Theta_K}{\Theta_X} - 1 \right) \right] = \left[0,1 + 0,05 \left(\frac{1000}{700} - 1 \right) \right] = \pm 0,17\% ;$$

$$\Delta\Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\delta_{\Theta.зр} \cdot \Theta_X}{100} = \frac{0,17 \cdot 700}{100} = \pm 1,2^{\circ}C .$$

3. Результуюча похибка $\Delta\Theta_{X.зр}$ вимірювання температури $\Theta_X = 700$ °C розраховуємо $\Delta\Theta_{X.зр} = \pm(\Delta\Theta_{ТО.зр} + \Delta\Theta_{ВП.зр}) = \pm(3,9 + 1,2) = \pm 5,1^{\circ}C$.

Термоелектричні термометри використовуються для вимірювання температури у діапазоні від мінус 270 до плюс 2200 °С. Робочий кінець перетворювача поміщають у середовище, температуру якого вимірюють, а вільні кінці під'єднують до вторинного приладу за допомогою спеціальних термоелектродних проводів, які виготовляють з того самого матеріалу, що й термоелектроди термоелектричного перетворювача.

Як вторинний прилад, у комплекті з термоелектричними перетворювачами використовують пірометричні мілівольтметри, автоматичні компенсатори та цифрові вимірювальні прилади.

Найпростіше вимірювальне коло термометра з термоелектричним перетворювачем - термопарою, зображено на рисунку 9.20.

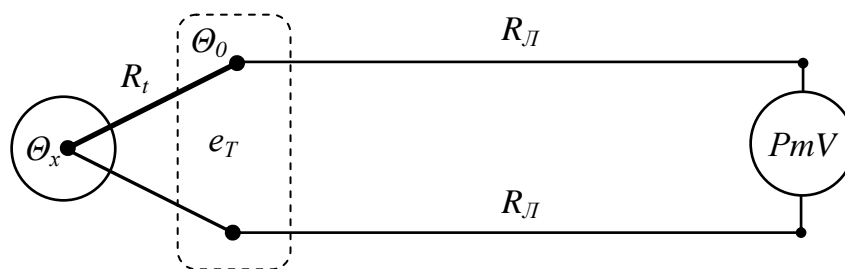


Рисунок 9.20 - Вимірювальне коло термометра з термоелектричним перетворювачем

Метрологічні характеристики деяких автоматичних компенсаторів та цифрових приладів, призначених для вимірювань температури у комплекті з термоелектричними перетворювачами, наведено в таблиці 9.4.

Розглянемо теоретичні положення щодо визначення похибок вимірювання температури термоелектричними термометрами.

Похибка $\Delta\Theta_x$ вимірювання температури Θ_x за допомогою термоелектричного перетворювача та вторинного приладу (автоматичного компенсатора або цифрового вимірювального приладу) має такі складові

$$\Delta\Theta_x = \Delta\Theta_{ТП} + \Delta\Theta_{ТЕП} + \Delta\Theta_{ВП}, \quad (9.30)$$

де $\Delta\Theta_{ТП}, \Delta\Theta_{ТЕП}, \Delta\Theta_{ВП}$ - відповідно похибки термоелектричного перетворювача, термоелектричних проводів та вторинного приладу, °С.

Похибка $\Delta\Theta_{ТП}$ має дві складові – інструментальну, яка зумовлена відхиленням дійсної статичної характеристики перетворення термоелектричного перетворювача від номінального, і методичну, яка виникає через відхилення температури робочого кінця термоелектричного перетворювача Θ_p від вимірюваної температури Θ_x .

Таблиця 9.4 - Метрологічні характеристики автоматичних компенсаторів та цифрових приладів у комплекті з термоелектричним перетворювачами

| Назва приладу | Тип приладу | Тип ПВП | Діапазон вимірювань, °C | Клас точності | Дискретність показів, °C |
|-------------------------------|-------------|---------|-------------------------|---------------|--------------------------|
| Автоматичний компенсатор | КСП-2 | ТХА | 0...900 | 0,5 | - |
| | КСП-2 | ТХК | 0...600 | 0,5 | - |
| | КСП-4 | ТХА | 0...1100 | 0,2 | - |
| Цифровий вимірювальний прилад | A565 | ТХА | 0...1400 | 0,1/0,06 | 0,2 |
| | A565 | ТХК | 50...800 | 0,15/0,05 | 0,1 |
| | ЦР7701-01 | ТХА | 200...1400 | 0,1/0,05 | 0,1 |
| | ЦР7701-01 | ТХК | 200...800 | 0,1/0,03 | 0,1 |

Значення методичної похибки залежить від умов теплообміну між робочим кінцем термоелектричного перетворювача та середовищем, температуру якого вимірюють. На практиці таку похибку намагаються звести до мінімуму, застосовуючи відповідну конструкцію термоелектричного перетворювача і встановлюючи його на об'єкті так, щоб забезпечити максимальне вирівнювання температур Θ_P та Θ_X . Граничне значення $\Delta\Theta_{ТЕП.зр}$ основної інструментальної похибки термоелектричного перетворювача розраховується за формулами, які наведені в таблиці 9.5.

Похибка $\Delta\Theta_{ТЕП.зр}$ зумовлена відхиленням термо-ЕРС термоелектричних проводів від номінального значення і її граничне значення можна знайти за формулою

$$\Delta\Theta_{ТЕП.зр} = \pm \frac{\Delta E_{ТЕП.зр}}{S_{ТЕЕ}}, \quad (9.31)$$

де $\Delta E_{ТЕП.зр}$ - границя допустимого відхилення термо-ЕРС термоелектричних проводів від номінального значення статичної характеристики, мВ;

$S_{ТЕЕ}$ - чутливість термоелектричних проводів термоелектричних проводів, мВ/°C.

Похибка $\Delta\Theta_{ВП}$ показу вторинного приладу складається з його основної та додаткових інструментальних похибок.

Таблиця 9.5 - Границі допустимих відхилень характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів від НСХП

| Тип перетворювача | Клас допуску | Діапазон температур, °C | Границі допустимих відхилень від НСХП, $\pm \Delta\Theta_{ТП.зр}, ^\circ C$ |
|-------------------|--------------|-------------------------|---|
| ТХА | 3 | мінус 250...плюс 166,7 | $0,015 \cdot \Theta $ |
| | | мінус 166,7... плюс 40 | 2,5 |
| | 2 | мінус 40...плюс 333,4 | 2,5 |
| | | плюс 333,4... плюс 1350 | $0,0075 \cdot \Theta$ |
| | 1 | мінус 40... плюс 375 | 1,5 |
| | | плюс 375... плюс 1350 | 0,004 |
| ТХК | 3 | мінус 200...плюс 100 | $1,5 + 0,01 \cdot \Theta $ |
| | | мінус 100...плюс 100 | 2,5 |
| | 2 | мінус 40...плюс 400 | 2,5 |
| | | плюс 400... плюс 800 | $0,7 + 0,005 \cdot \Theta$ |

При використанні автоматичного компенсатора граничне значення його основної похибки розраховується за формулою

$$\Delta\Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\Delta U_{зр}}{S_{ТП}}, \quad (9.32)$$

де $\Delta U_{зр}$ - допустиме значення основної абсолютної похибки компенсатора, мВ.

$S_{ТП}$ - чутливість термоелектричного перетворювача, мВ/°C.

Допустима основна зведена похибка автоматичних компенсаторів визначається за формулою

$$\gamma_{зр} = \pm \frac{\Delta U_{зр}}{U_{норм}} \cdot 100\%. \quad (9.33)$$

Чутливість термоелектричного перетворювача визначається за формулою

$$S_{ТП} = \frac{\Delta E_{ТП}}{\Delta\Theta}, \quad (9.34)$$

де $\Delta\Theta = \Theta_2 - \Theta_1$ - приріст температури відносно точки Θ_x , °C;

$\Delta E_{ТП} = E_{\Theta_2} - E_{\Theta_1}$ - відповідний приріст термо-ЕРС термоелектричного перетворювача, мВ.

В таблиці 9.6 наведені нормальні статичні характеристики перетворення (НСХП) термоелектричних перетворювачів.

Таблиця 9.6 - Нормальні статичні характеристики перетворення (НСХП)
термоелектричних перетворювачів

| Температура робочого кінця, $\Theta_p, ^\circ C$ | | -200 | -50 | 0 | 20 | 200 | 400 | 500 |
|--|-----|--------|--------|------|--------|--------|--------|--------|
| термо-ЕРС, E_{Θ_p} при $\Theta_{\text{вкл.кінц.}}=0 ^\circ C$ | ТХА | -5,891 | -1,889 | 0 | 0,798 | 8,137 | 16,395 | 20,640 |
| | ТХК | -9,488 | -3,004 | 0 | 1,289 | 14,557 | 31,488 | 40,292 |
| Температура робочого кінця, $\Theta_p, ^\circ C$ | | 600 | 700 | 800 | 1000 | 1100 | 1200 | 1400 |
| термо-ЕРС, E_{Θ_p} при $\Theta_{\text{вкл.кінц.}}=0 ^\circ C$ | ТХА | 24,902 | 29,128 | 33,3 | 41,269 | 45,108 | 48,828 | 52,398 |
| | ТХК | 49,098 | 57,857 | 66,5 | - | - | - | - |

При використанні цифрового вторинного приладу граничне значення його основної похибки $\Delta\Theta_{\text{ВП.зр}}$ визначають за формулою

$$\Delta\Theta_{\text{ВП.зр}} = \pm \frac{\delta_{\Theta.\text{зр}} \cdot \Theta_X}{100}. \quad (9.35)$$

Приклад 9.2 Оцінити похибку вимірювання температури $\Theta_X = 500 ^\circ C$ за допомогою автоматичного компенсатора КСП2 класу точності 0,5 з діапазоном вимірювання від $0 ^\circ C$ до плюс $800 ^\circ C$, який працює в комплекті з термоелектричним перетворювачем типу ТХА класом допуску 2.

Розв'язання 1. Граничне значення похибки термоелектричного перетворювача типу ТХА класу допуску 2 при температурі $500 ^\circ C$ визначаємо за формулою

$$\Delta\Theta_{\text{ТП.зр}} = \pm 0,0075 \cdot \Theta_X = \pm 0,0075 \cdot 500 = \pm 3,75 ^\circ C.$$

2. Граничне значення похибки $\Delta\Theta_{\text{ТЕП.зр}}$ термоелектричних проводів перетворювача типу ТХА визначаємо за формулою $\Delta\Theta_{\text{ТЕП.зр}} = \pm \frac{\Delta E_{\text{ТЕП.зр}}}{S_{\text{ТЕЕ}}}$,

$$\Delta\Theta_{\text{ТЕП.зр}} = \pm \frac{\Delta E_{\text{ТЕП.зр}}}{S_{\text{ТЕЕ}}},$$

при цьому,

$$S_{\text{ТЕП}} = \frac{E_{\text{ТЕП}}}{\Theta_p - \Theta_{\text{вкл.кінц}}} = \frac{4,10}{100 - 0} = 0,041 \text{ мВ}/^\circ C;$$

$$\Delta\Theta_{\text{ТЕП.зр}} = \pm \frac{\Delta E_{\text{ТЕП.зр}}}{S_{\text{ТЕЕ}}} = \pm \frac{0,15}{0,041} = \pm 3,66 ^\circ C.$$

3. Допустиме значення основної абсолютної похибки компенсатора дорівнює

$$\Delta U_{\text{зр}} = \pm \frac{\gamma_{\text{зр}} \cdot U_{\text{норм}}}{100} = \pm \frac{0,5 \cdot 33,277}{100} = \pm 0,166 \text{ мВ};$$

$$\text{де } U_{\text{норм}} = |E_{\Theta_K} - E_{\Theta_{\text{П}}}| = |E_{800} - E_0| = |33,277 - 0| = 33,277 \text{ мВ};$$

4. Чутливість термоелектричного перетворювача визначаємо

$$S_{ТП} = \left(\frac{\Delta E_{ТП}}{\Delta \Theta} \right) = \frac{E_{600} - E_{400}}{600 - 400} = \frac{29,902 - 16,395}{200} = 0,0425 \text{ мВ}/^{\circ}\text{С}.$$

5. Граничне значення похибки $\Delta \Theta_{ВП.зр}$ автоматичного компенсатора буде дорівнювати $\Delta \Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\Delta U_{зр}}{S_{ТП}} = \frac{0,166}{0,0425} = \pm 3,9^{\circ}\text{С}.$

6. Результуюча похибка $\Delta \Theta_{Х.зр}$ вимірювання температури $\Theta_{Х} = 500^{\circ}\text{С}$

$$\Delta \Theta_{Х.зр} = \pm(\Delta \Theta_{ТП.зр} + \Delta \Theta_{ТЕП.зр} + \Delta \Theta_{ВП.зр}) = \pm(3,75 + 3,66 + 3,9) = \pm 11^{\circ}\text{С}.$$

9.5 Методи та засоби вимірювання механічних величин

Із механічних величин, які вимірюють найчастіше, основними є механічні зусилля. Їх поділяють на: механічні сили, які спрямовані лінійно, та крутні моменти, які є обертовими, а також на розподілені зовнішні зусилля – тиск, та внутрішні розподілені зусилля, що виникають в тілі об'єкту, що досліджується - механічні напруження. Принцип вимірювань механічних величин оснований на відомих в механіці залежностях деформацій та напруг в матеріалі від сил та тиску. Ці залежності дозволяють встановити вид перетворювання механічної величини, обрати тип перетворювача та вимірювального кола.

Вимірювання сили F , відносної деформації $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$, модуля пружності E і механічних напружень σ , що виникають у тілі площею S при дії на нього сили F , є однією і тією самою задачею, так як справедливе таке відношення

$$\sigma = \varepsilon_l \cdot E = \frac{F}{S}. \quad (9.36)$$

Вимірювання механічних напружень. Найпоширенішим способом визначення механічних напружень є вимірювання деформації поверхні об'єкту, що досліджується. Діапазон вимірюваних деформацій дуже широкий, а саме, від часток мікрометра в металах та в твердих пластмасах до десятків сантиметрів у зразках з еластичних матеріалів.

Найпростішим методом вимірювань деформацій є тензометричний метод, первинним перетворювачами деформації в якому є тензорезистори, які наклеюються на досліджувану деталь спеціальними клеями. Особливістю тензорезисторів, що наклеєні на об'єкт, є те, що їх не можна переклеїти з об'єкта та інший об'єкт.

У схемі, яка наведена на рисунку 9.21, тензорезистор R_4 працює на розтягнення і опір його збільшується, тензорезистор R_3 працює на стиснення, як наслідок, опір його зменшується.

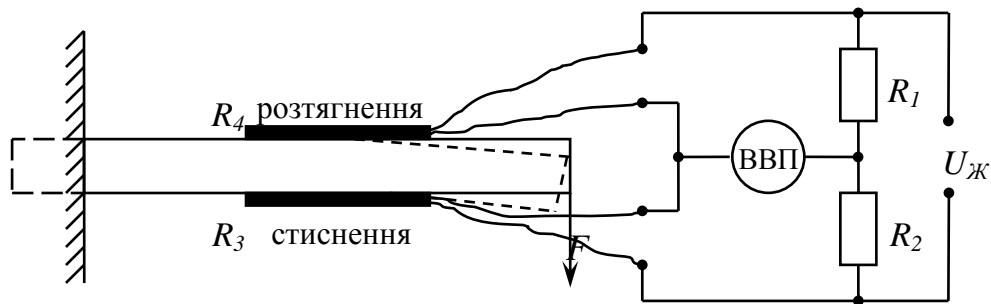


Рисунок 9.21 – Схема вимірювання механічних напружень

Вихідна напруга вимірювального моста дорівнює

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{ж}} \cdot \frac{(1 + \varepsilon_{R4}) \cdot R_4 \cdot R_2 - (1 - \varepsilon_{R3}) \cdot R_3 \cdot R_1}{[(1 + \varepsilon_{R4}) \cdot R_4 + (1 - \varepsilon_{R3}) \cdot R_3] \cdot (R_2 + R_1)}, \quad (9.37)$$

де $U_{\text{ж}}$ - напруга живлення;

ε_{R3} , ε_{R4} – відносні зміни опорів тензорезисторів R_3 та R_4 , спричинені деформацією деталі, на яку наклеєні ці тензорезистори;

R_1 та R_2 – опори ненавантажених тензорезисторів.

Вихідну напругу вимірювального моста вимірюють вторинним приладом ВП, а саме, цифровим мілівольтметром з високим входним опором. Так як відносна зміна опору тензорезистора ε_R пов'язана з відносною деформацією ε_l деталі, на яку наклеєний тензорезистор, коефіцієнтом тензочутливості k , тобто $\varepsilon_R = k\varepsilon_l$, тоді вимірювані величини визначаються за виразами

- відносна деформація

$$\varepsilon_l = \frac{2}{kU_{\text{ж}}} \cdot U_{\text{вих}}. \quad (9.38)$$

- механічне напруження

$$\sigma = \frac{2 \cdot E}{kU_{\text{ж}}} \cdot U_{\text{вих}}. \quad (9.39)$$

Вимірювання механічних сил. Переважна більшість силоримірювальних пристроїв - динамометрів основана на методі перетворення вимірюваної сили на механічні напруження у матеріалі пружного перетворювального елемента і його деформацію, які за допомогою тензорезистивних, індуктивних та п'єзоелектричних, магнітопружних перетворювачів, перетворюються на електричний сигнал або зміну вихідного електричного параметра.

Залежно від значення вимірюваної сили, як первинні перетворювачі використовують стрижневі елементи, пружні кільця або консольні пружні елементи. Вторинними перетворювачами динамометрів з механічними пружними перетворювачами сили на деформацію є переважно тензорезистивні перетворювачі, а вторинними вимірювальними кола є мостові вимірювальні кола. Похиб-

ка вимірювань такими динамометрами складає 1...2%. Отже, для вимірювання сили F_x придатна схема (див. рисунок 9.21), з одним робочим та одним компенсуючим тензорезисторами.

На практиці застосовують складніші схеми тензометричних мостів, в яких, крім основних (робочих) тензорезисторів, увімкнені також й регулювальний резистор для встановлення початкового значення діапазону вимірювань, термозалежний резистор для компенсації зміни чутливості схеми від зміни температури довкілля, резистор для регулювання і встановлення номінальної чутливості. Термозалежний резистор повинен мати достатній тепловий контакт з об'єктом дослідження, на якому наклеєні робочі тензорезистори. Для цього застосовують електроізоляційний клей з високою теплопровідністю. Значення механічних кіл за результатами вимірювань деформацій розраховують зі співвідношення між вимірюваною силою F_x та деформацією ε_l для відповідних перетворювачів:

- для пружного перетворювача у вигляді стрижня сталого перерізу

$$F_x = S \cdot E \cdot \varepsilon_l, \quad (9.40)$$

де S – площа поперечного перерізу стрижня;

E – модуль пружності матеріалу стрижня;

- для консольної балки рівномірного перерізу

$$F_x = \frac{E \cdot h^2 \cdot b}{6 \cdot (l - x)} \cdot \varepsilon_l, \quad (9.41)$$

де b, h, l – геометричні розміри балки;

x – відстань від місця закріплення балки до середини тензорезистора.

Незважаючи на порівняно низьку точність (2...3 %), широко застосовують для вимірювань великих сил ($10^5 \dots 10^6$ Н) динамометри з магнітопружними перетворювачами, які відрізняються простотою конструкції, високою надійністю, значною потужністю вхідного сигналу. Один з перетворювачів є робочим, а другий ідентичний йому перетворювач призначений для компенсації початкової індуктивності робочого перетворювача, а також для компенсації впливу зовнішніх чинників, зокрема температури довкілля, частоти джерела живлення.

Основою п'єзоелектричних динамометрів є п'єзоелектричні перетворювачі сили на електричний заряд. При введенні у п'єзодинамометри підсилювачів заряду у тисячі разів зменшилось стикання заряду та стала можливою довготривала підтримка значення вихідного сигналу, що дало можливість створити сучасні п'єзодинамометри і для вимірювання сталих сил. До переваг

п'єзодинамометрів належить їх висока чутливість, висока швидкодія, а зведена похибка знаходиться у межах 1 %.

Кутіві швидкості обертальних частин машин та механізмів вимірюють *тахометрами*. Застосовуються два основні види тахометрів: на визначенні частоти обертання об'єкта дослідження та на порівнянні частоти об'єкту зі стабільною частотою незалежного джерела. Прилади для вимірювання *крутних моментів* мають назву *торсіометри*, принцип дії яких оснований на вимірюванні дотичних напруг, які виникають в матеріалі вала та які зв'язані з крутним моментом співвідношенням

$$M = \tau \cdot W_p, \quad (9.42)$$

де W_p – полярний момент опору круглого валу радіусом r ;
 τ – дотична напруга.

На рисунку 9.22 наведений фрагмент наклеювання тензорезисторів на вал зі струмознімачем торсіометра.

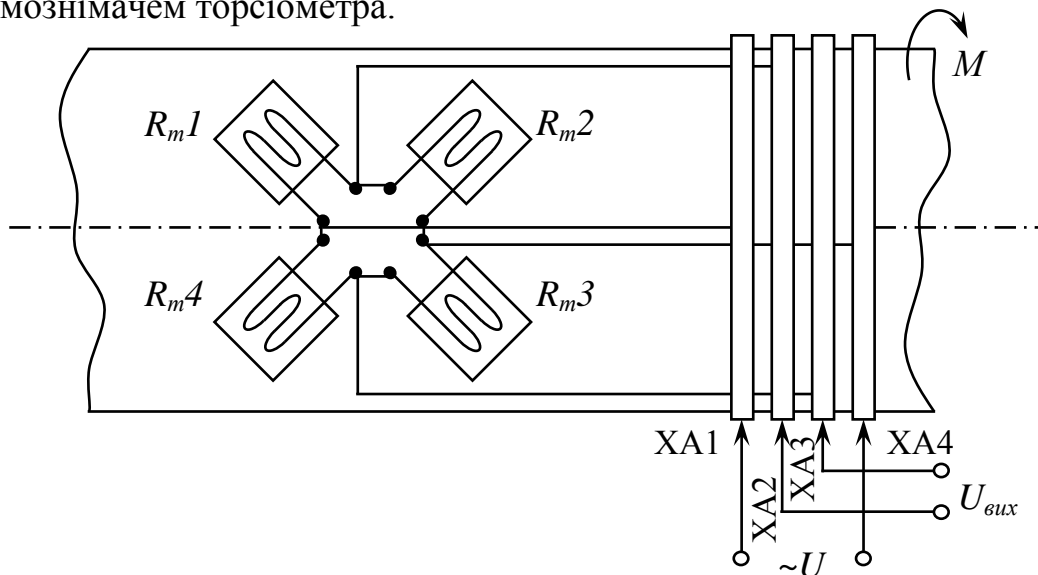


Рисунок 9.22 – Фрагмент наклеювання тензорезисторів на вал зі струмознімачем торсіометра

Тензорезистори наклеюються до напрямку найбільших дотичних напруг, тобто під кутом 45^0 до осі вала. Включення тензорезисторів до двох сусідніх плечей вимірювального моста забезпечує не тільки температурну компенсацію, а й усувається вплив вигину вала на результат вимірювання, так як значення та знаки деформацій обох перетворювачів однакові. Струмознімач є найбільш важливою частиною торсіометра, який з'єднує тензорезистори з електричним вимірювальним колом. За конструкцією струмознімач - це контактне кільце на валу та контактні щітки. Для зменшення впливу паразитних контактних термо-ЕРС вимірювальні схеми живляться змінним струмом.

Основним параметром руху рідин та газів є витрата речовини, яка протікає через повний перетин його потоку за одиницю часу. Діапазон витрат знаходиться у межах від 10^{-3} до декількох тисяч кубометрів за годину.

Прилади для вимірювання витрати мають назву *витратоміри*, а для вимірювання кількості речовини – *лічильники кількості*. Методи вимірювань дуже різноманітні, а кількість різновидів витратомірів та лічильників велика. Найпоширенішими є витратоміри змінного перепаду тисків із звужувальними пристроями, сталого перепаду тиску з перетвореннями витрати на силу та переміщення (ротаметри), тахометричні, теплові та індукційні витратоміри.

Для вимірювання швидкості та об'ємної витрати електропровідних рідин в трубопроводах застосовують індукційні (електромагнітні) витратоміри. Принцип дії таких витратомірів оснований на законі електромагнітної індукції згідно якого ЕРС, яка виникає в провіднику, прямо пропорційна швидкості його руху в магнітному полі. Під дією змінного магнітного потоку, який створюється електромагнітом, в потоці рідини виникає ЕРС, значення якої пропорційне швидкості руху рідини та її об'ємній витраті.

На рисунку 9.23 наведена схема індукційного (електромагнітного) витратоміра, який складається з: труби з ізоляційного матеріалу (1); електромагніту (2); з магнітної системи (3); з обмотки електромагніту (4); з двох електродів (5); з додаткової компенсаційної обмотки (6); з резистора регулювання (7); з підсилювача (8); з вторинного вимірювального приладу (9).

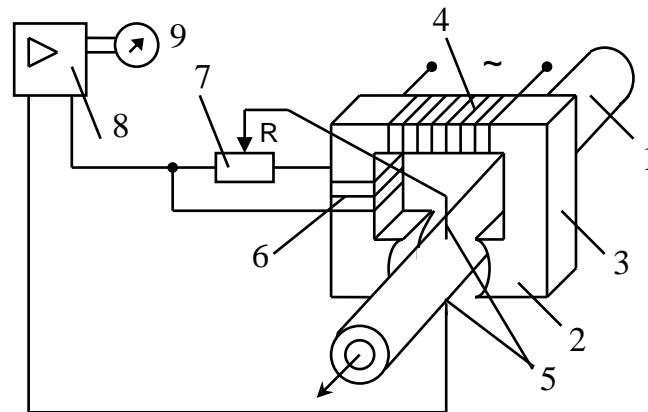


Рисунок 9.23 – Схема індукційного (електромагнітного) витратоміра

9.6 Методи та засоби вимірювання рівня рідин

Вимірювання рівня – це визначення відстані між двома паралельними площинами, одна з яких є лінією відліку, друга – площиною, яка розділяє два середовища різної густини.

Рівнемір – перетворювач для безперервного вимірювання рівня в будь – якій точці ємності. *Сигналізатор рівня* – перетворювач для контролю рівня в окремих точках ємності.

Розглянемо прилади для вимірювання рівня рідини більш детально.

На рисунку 9.24 наведено схему електромеханічного поплавкового рівнеміра з реостатним перетворювачем переміщення та логотричним вимірювальним приладом для вимірювання рівня пального в закритих баках.

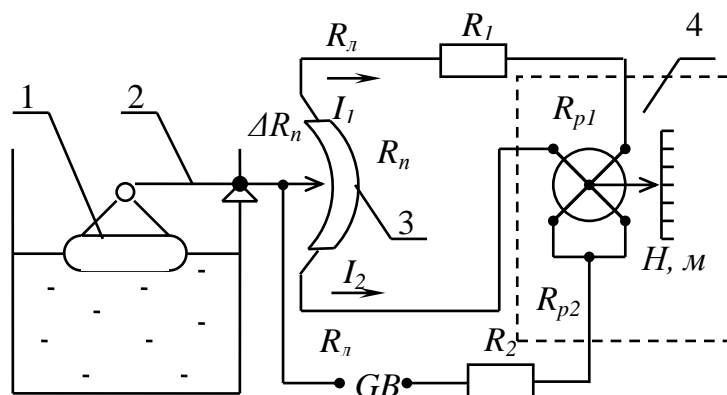


Рисунок 9.24 - Схема поплавкового рівнеміра

Поплавок 1 розміщений в баку з досліджуванним рівнем і механічно через штангу 2 зв'язаний з повзунком реостатного перетворювача 3. Резистори R_1 та R_2 призначені для узгодження параметрів перетворювача та логотричного приладу для того, щоб забезпечити заданий діапазон вимірювань. У разі зміни досліджуваного рівня та відповідного переміщення поплавка повзунком реостатного перетворювача, змінюючи співвідношення опорів у колах рамок логотричного приладу, змінює і відношення струмів, а тим самим і відхилення стрілки логотричного приладу на кут α та його покази

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_n - \Delta R_n + R_l + R_1 + R_{p2}}{\Delta R_n + R_l + R_1 + R_{p1}}\right). \quad (9.43)$$

Шкала таких рівнемірів проградуєвана у значеннях вимірюваного рівня або у частках максимального рівня, прийнятого за одиницю. До переваг логотричних кіл належить незмінність показів під час коливання напруги джерела живлення та незначний вплив опору лінії.

Прилад для вимірювання рівня рідини з поплавком змінного занурення має назву *буйковий рівнемір*. Вхідною величиною такого приладу є зміна ваги рідини, яка виштовхується поплавком. Схема такого приладу має вигляд, який наведена на рисунку 9.25. Робота таких перетворювачів рівня основана на використанні виштовхувальної сили, що діє на занурене у рідину тіло (буйок 1) у вигляді циліндра, довжина якого набагато більша від його діаметра – рисунок 9.25, а питома густина значно більша від питомої густини досліджуваної рідини.

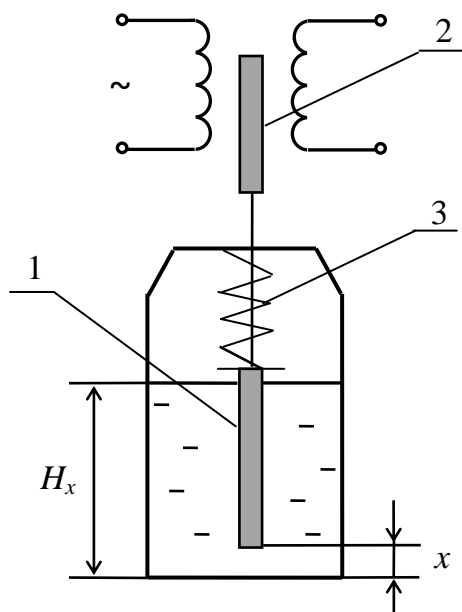


Рисунок 9.25 – Схема буйкового (плунжерного) рівнеміра

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 нерухомих частин перетворювача. Залежно від рівня рідини на буйок діятиме підйомна сила, внаслідок чого пружина стискається, чутливим елементом є плунжер індуктивного та взаємодуктивного перетворювача, який переміщується, змінюючи відповідно вихідну індуктивність, і як наслідок, повний електричний опір.

Характеристику градування буйкового перетворювача можна визначити, враховуючи, що під час занурення буйка в рідину на нього діє виштовхувальна сила

$$F_x = S \cdot (H - x) \cdot \rho_p \cdot g, \quad (9.44)$$

де H – рівень рідини;

x – переміщення буйка;

S – площа поперечного перерізу буйка;

ρ_p - питома густина рідини.

Сила пружності пружини змінюється на величину $F_{np} = W \cdot x$. Переміщення буйка в кінцевому результаті буде дорівнювати

$$x = H \cdot \frac{1}{1 + \frac{W}{\rho_p \cdot g \cdot S}}. \quad (9.45)$$

Вторинними вимірювальними приладами таких рівнемірів є прилади з астатичним зрівноважувальним перетворенням та вторинним диференціально-трансформаторним перетворювачем.

На рисунку 9.26 наведена схема буйкового рівнеміра зрівноважувального перетворення. Вихідною величиною таких приладів є струм. Такі рівнеміри призначені для вимірювання рівня рідин у технічних місткостях з рівнем заповнення до 10...16 м. Їх зведена похибка знаходиться у межах до 1,5 %.

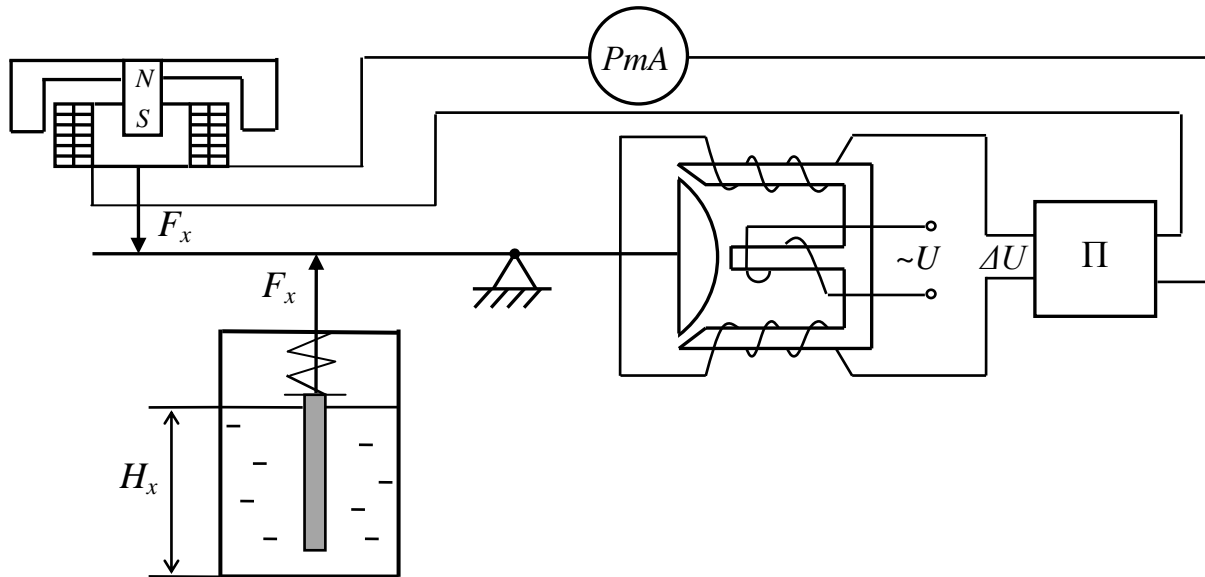


Рисунок 9.26 - Схема буйкового рівнеміра зрівноважувального перетворення

Розглянемо принцип дії рівнеміра більш детально. На буйок, занурений у досліджувану рідину, діятиме виштовхувальна сила F_x , що приводить до його переміщення. Це переміщення за допомогою коромисла перетворюється на поворот осердя диференціально-трансформаторного перетворювача. Нерухома частина магнітопроводу виконана у вигляді Ш-подібного осердя. На середньому його стрижні намотана первинна намагнічувальна обмотка, що живиться від джерела змінної напруги. Дві ідентичні вимірювальні обмотки, намотані на крайні стрижні, утворюють два ідентичні перетворювальні елементи. Обмотки з'єднані послідовно і зустрічно.

Диференціально-трансформаторний перетворювач рівня, який побудований так, що за нульового значення вимірюваного рівня чи деякого його номінального значення рухоме осердя займає симетричне щодо обох перетворювальних елементів положення, а наведені в них ЕРС будуть однаковими, при цьому 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 пода-

рматорів $TV1$ та $TV2$. Пристрій працює в режимі статичного зрівноважувального перетворення.

Покази вольтметра U_{PV} будуть пропорційні до зміни вимірюваного рівня H_x і не залежатимуть від значення діелектричної проникності середовища ϵ_x , так як

$$U_{PV} = \frac{H_x}{l_k} \cdot \frac{w_2 \cdot w_4}{w_1 \cdot w_5} \cdot U = k \cdot H_x \cdot U, \quad (9.46)$$

де l_k – довжина компенсаційного конденсатора, який повністю занурений в середовище;

U – напруга на виході генератора;

H_x – вимірюваний рівень.

Контрольні запитання при вивченні до теми 9

- 1 Які основні особливості вимірювань неелектричних величин електричними засобами вимірювань?
- 2 Які принципи відмінності між генераторними та параметричними перетворювачами?
- 3 Які Вам відомі різновиди вимірювальних перетворювачів залежно від їх функції перетворення?
- 4 Як класифікують вимірювальні перетворювачі залежно від фізичних закономірностей, які покладені в основу їх принципу дії?
- 5 Назвіть основні різновиди пружних перетворювачів механічних зусиль.
- 6 Поясніть принцип дії генераторних первинних перетворювачів та наведіть рівняння перетворення.
- 7 Поясніть принцип дії параметричних первинних перетворювачів переміщень. Оцініть характер функції перетворення.
- 8 Поясніть принцип дії та наведіть рівняння перетворення термоелектричного перетворювача температури.
- 9 Опишіть принцип дії узагальненої структурної схеми приладу для вимірювання неелектричних величин.
- 10 Назвіть методи та охарактеризуйте засоби вимірювання механічних величин та рівня.
- 11 Назвіть методи та охарактеризуйте засоби вимірювання температури.
- 12 Назвіть методи та охарактеризуйте засоби вимірювання рівня рідин.

Список літератури

1. Нестерчук Д.М. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.
2. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
3. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
4. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 656 с.
5. Гуржій А.М. Електричні і радіотехнічні вимірювання / А.М. Гуржій, Н.І Поворознюк – К.: Нав. книга, 2002. – 287 с.
6. Панев Б.И. Электрические измерения. Справочник / Б.И.Панев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.
7. Измерения электрических и неэлектрических величин / Н.Н.Евтихийев, Я.А. Купершмидт и др.; Под общ. ред. Н.Н.Евтихиева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.