

**Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет**

НЕСТЕРЧУК Д.М., КВІТКА С.О., ГАЛЬКО С.В.

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

*Рекомендовано Вченою радою
Таврійського державного агротехнологічного університету
як навчальний посібник для підготовки здобувачів
ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Мелітополь

2017

УДК 006.91(075)

ББК 30.10+31.22]я73

H55

*Гриф надано Вченою радою Таврійського державного агротехнологічного
університету*

(протокол №4 від «28» листопада 2017 р.)

Рецензенти:

Андрієнко П.Д., д.т.н., професор, завідувач кафедри «Електричні і електронні апарати», Запорізький національний технічний університет

Пазюк М.Ю., д.т.н., професор, завідувач кафедри «Автоматизація технологічних процесів і виробництва», Запорізька державна інженерна академія

Діордієв В.Т., д.т.н., професор, завідувач кафедри «Електроенергетика і автоматизація», Таврійський державний агротехнологічний університет

Нестерчук Д.М.

H55 Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 256 с.

ISBN 978-617-7218-38-7

У навчальному посібнику викладено основні положення метрології, теорії вимірювань та забезпечення єдності вимірювань, загальні відомості про засоби вимірювальної техніки та їх метрологічні характеристики. Детально розглянуто питання теорії похибок вимірювань і опрацювання результатів вимірювань та висвітлено питання метрологічної перевірки засобів вимірювань електричних величин. Всі розділи посібника містять типові вимірювальні задачі та приклади їх розв'язання, а також тестові контрольні завдання для самоаналізу.

Навчальний посібник призначений для викладачів при підготовці до лекційних, практичних занять та до лабораторних робіт з дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології», а також для студентів вищих навчальних закладів при підготовці здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© Нестерчук Д.М.

© Квітка С.О.

© Галько С.В.

© «Таврійський державний
агротехнологічний університет», 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	6
ЧАСТИНА 1. ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ	
РОЗДІЛ 1. МЕТРОЛОГІЯ – НАУКА ПРО ВИМІРЮВАННЯ	7
1.1 Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»	7
1.2 Основні терміни в галузі метрологічної діяльності	7
<i>Контрольні запитання до розділу 1</i>	13
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 1</i>	14
РОЗДІЛ 2. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ВИМІРЮВАННЯ	17
2.1 Фізична величина та види величин	17
2.2 Одиниці фізичних величин. Система одиниць	20
2.3 Еталони одиниць фізичних величин	25
2.4 Систематизація фізичних величин	27
2.5 Вимірювання як процес отримання кількісної інформації про вимірювальну величину	28
2.6 Загальна класифікація вимірювань	31
2.7 Принцип і методи вимірювань	37
2.8 Значущість вимірювань	42
<i>Контрольні запитання до розділу 2</i>	43
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 2</i>	44
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 2</i>	44
РОЗДІЛ 3. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ	47
3.1 Засоби вимірювань, їх види та класифікаційні ознаки	47
3.2 Вимірювальні прилади	47
3.3 Засоби вимірювання	51
3.4 Структурні схеми вимірювальних приладів та систем	54
3.5 Аналогові та цифрові вимірювальні прилади	58
3.6 Характеристики засобів вимірювальної техніки	60
3.7 Класифікація засобів вимірювань за метрологічними характеристиками	72
3.8 Класифікація похибок вимірювань та їх нормування	72
<i>Контрольні запитання до розділу 3</i>	82
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 3</i>	83
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 3</i>	84
РОЗДІЛ 4. ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ	89
4.1 Загальні положення	89
4.2 Фактори, які впливають на процес формування похибок вимірювання ..	90
4.3 Класифікація похибок вимірювань	91
4.4 Абсолютна та відносна похибка	94

4.5 Систематична та випадкова похибки	96
4.6 Виявлення та виключення систематичних похибок	105
4.7 Опрацювання результатів вимірювання	108
<i>Контрольні запитання до розділу 4</i>	115
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 4</i>	116
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 4</i>	116
РОЗДІЛ 5. МЕТРОЛОГІЧНА ПОВІРКА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ	120
5.1 Мета і види метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки	120
5.2 Методи метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки	121
5.3 Метрологічна повірка приладів прямого перетворення	126
<i>Контрольні запитання до розділу 5</i>	134
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 5</i>	135
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 5</i>	136
ЧАСТИНА 2. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ	
РОЗДІЛ 6. Вимірювальні перетворювачі електричних величин	139
6.1 Загальні положення	139
6.2 Резистивні перетворювачі	141
6.3 Подільники напруги	145
6.4 Вимірювальні трансформатори струму та напруги	149
6.5 Вимірювальні підсилювачі	156
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 6</i>	161
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 6</i>	163
РОЗДІЛ 7 МІРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН	168
7.1 Загальні положення	168
7.2 Міри електрорушійної сили постійного струму	170
7.3 Міри електричного опору	172
7.4 Міри індуктивності та взаємної індуктивності	175
7.5 Міри ємності	178
<i>Контрольні запитання до розділу 7</i>	181
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 7</i>	182
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 7</i>	183
РОЗДІЛ 8 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ	186
8.1 Загальні положення	186
8.2 Магнітоелектричні вимірювальні прилади	192
8.2.1 Загальні положення	192
8.2.2 Магнітоелектричні амперметри і вольтметри	195
8.2.3 Магнітоелектричні омметри	195

8.3 Електромагнітні вимірювальні прилади	199
8.3.1 Загальні положення	199
8.3.2 Електромагнітні амперметри і вольтметри	201
8.4 Електродинамічні та феродинамічні вимірювальні прилади	203
8.4.1 Загальні положення	203
8.4.2 Амперметри і вольтметри електродинамічної системи	206
8.4.3 Ватметри і варметри електродинамічної системи	208
8.4.4 Електродинамічний частотомір	211
8.4.5 Електродинамічний фазометр	212
8.5 Електростатичні вимірювальні прилади	214
8.6 Індукційні вимірювальні прилади	217
<i>Контрольні запитання до розділу 8</i>	221
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 8</i>	223
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 8</i>	224
РОЗДІЛ 9 ВИМІРЮВАЛЬНІ МОСТИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ	
КОМПЕНСАТОРИ	228
9.1 Загальні положення	228
9.2 Вимірювальні мости постійного струму	231
9.3 Мости змінного струму	237
9.4 Компенсаційні засоби вимірювань	245
9.4.1 Компенсатори постійного струму	245
9.4.2 Компенсатори змінного струму	247
<i>Контрольні запитання до розділу 9</i>	249
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 9</i>	250
Список літератури	253

ПЕРЕДМОВА

Прискорений темп розвитку метрології, як науки про вимірювання та вимірювальну техніку, зумовив появу нових термінів та понять, а також нового світогляду до принципів побудови засобів вимірювання та контролю.

Навчальний посібник націлений на формування у студентів базового комплексу знань з основ метрології, як науки, та основ засобів вимірювальної техніки, що і є основною метою вивчення навчальної дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології» при підготовці здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Посібник складений відповідно до програми навчальної дисципліни і містить теоретичний матеріал, практичні приклади, тестові завдання для самоконтролю, задачі для самостійного розв'язку, список рекомендованої літератури. У посібнику визначені основні положення та означення метрології, основні питання теорії похибок вимірювань, детально висвітлені питання метрологічного забезпечення електричних вимірювань та метрологічної перевірки засобів вимірювань електричних величин. Рівень матеріалу ґрунтується на знаннях і вміннях з фізики, вищої математики, теоретичних основ електротехніки, з електроніки та мікросхемотехніки в обсязі навчальних програм названих дисциплін.

У посібнику зібраний, систематизований і докладно викладений теоретичний та методичний матеріал, що охоплює всі питання основ метрології та засобів вимірювань. Структура навчального посібника та наведений теоретичний матеріал і практичні задачі з прикладами їх розв'язання є методично обґрунтованими та роблять посібник максимально зручним для самостійного опрацювання матеріалу студентами усіх форм навчання.

Під час підготовки посібника використано багаторічний досвід викладання дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології» на кафедрі «Електротехніка і електромеханіка імені професора В.В.Овчарова» в ТДАТУ з урахуванням досягнень в галузі вимірювальної техніки в Україні.

ЧАСТИНА 1. ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

РОЗДІЛ 1.

МЕТРОЛОГІЯ – НАУКА ПРО ВИМІРЮВАННЯ

1.1 Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»

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.

1.2 Основні терміни в галузі метрологічної діяльності

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 вирішування 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. Іденти-

фікацію 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.

Існує тісний взаємний взаємозв'язок метрології та стандартизації.

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.

Стандартизація – це діяльність, яка направлена на розробку та встановлення вимог, правил, норм чи характеристик. Мета стандартизації – це досягнення оптимального ступеня впорядкування в будь-якій галузі, результат при цьому – підвищення оптимального ступеня відповідності об’єктів стандартизації їх функціональному призначенню. Стандарти містять вимоги до матеріалів, виробів, технічної та технологічної документації, методів вимірювань та досліджень.

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.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 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?
- 7 Назвіть основні методи експериментальної інформатики.
- 8 Розкрийте поняття метрології «вимірювання», «контроль», «діагностика», «експериментальні дослідження».

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності – це ...

- 1 біологія
- 2 фізика
- 3 метрологія
- 4 оптика

2. Сукупність фізичних і математичних методів, які використовуються для отримання вимірювальної інформації мають назву ...

- 1 засоби метрології
- 2 метрологічна атестація
- 3 вимірювання
- 4 методи метрології

3. Що таке відображення вимірюваних величин їхніми значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів?

- 1 порівняння
- 2 лічба
- 3 контроль
- 4 вимірювання

4. Доповніть відповідь.

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

- 1 засоби метрології
- 2 еталони
- 3 робочі засоби вимірювальної техніки
- 4 методи метрології

5. Що таке відображення стану досліджуваного об'єкта під час дії на нього сукупності регламентованих факторів сертифікатом?

- 1 контроль
- 2 випробування
- 3 лічба
- 4 вимірювання

6. Вимірювальна інформація – це ...

- 1 значення фізичної величини, яке знайдене внаслідок її вимірювання
- 2 значення фізичної величини, яке знайдено експериментально, але відрізняється від істинного значення
- 3 параметр, в якому міститься інформація про значення вимірювальної величини
- 4 інформація про значення вимірюваних величин, може бути в аналоговій та цифровій формах

7. Що таке порівняння, як метод експериментальної інформатики?

- 1 це відображення властивості, залежності, стану або ситуації словесним чи графічним описом
- 2 це відображення подібності чи відмінності об'єктів логічним висновком
- 3 це відображення стану досліджуваного об'єкта під час дії на нього сукупності регламентованих факторів сертифікатом
- 4 це відображення загального стану об'єкта та причин цього стану діагнозом із зазначенням особливостей стану і локалізацією відхилень від норм

8. Що таке стандартизація?

- 1 це відображення загального стану об'єкта та причин цього стану діагнозом із зазначенням особливостей стану і локалізацією відхилень від норм.
- 2 це відображення відповідності між станом об'єкта і заданою нормою відповідним висновком (придатний чи непридатний)
- 3 це відображення залежності між величинами, що характеризують матеріальний об'єкт, математичною або логічною моделлю
- 4 це діяльність, яка направлена на розробку та встановлення вимог, правил, норм чи характеристик

9. Доповніть відповідь.

Відображення складного матеріального об'єкта або ситуації, що характеризується сукупністю взаємопов'язаних величин, системою відповідних моделей, має назву ...

- 1 випробування
- 2 спостереження
- 3 експериментальні дослідження
- 4 діагностика

10. Чи вірне твердження?

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?

- 1 вірне
- 2 не вірне

РОЗДІЛ 2.

ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ВИМІРЮВАННЯ

2.1 Фізична величина та види величин

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 2.1.

Таблиця 2.1 - 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
Момент електричний	p_e	Період	T

Продовження таблиці 2.1

Назва величини	Позначення	Назва величини	Позначення
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

$$x = N_{xq} \cdot q, \quad (2.1)$$

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.

2.2 Одиниці фізичних величин. Система одиниць

Одиниця фізичної величини згідно з ДСТУ 2681 – 94 – це певний розмір величини, прийнятий за угодою Генеральної конференції з мір та ваги для кількісного відображення однорідних з нею величин.

Суть вимірювання полягає у порівнянні розміру вимірюваної величини з деяким її значенням, прийнятим за одиницю. Якщо розмір величини збігається, то згідно з виразом (2.1) числове значення дорівнює одиниці, тобто

$$N_{xq} = \frac{x}{q} = 1.$$

Отже, за означенням **одиниця фізичної величини** – це такий розмір величини, за якого числовому значенню величини присвоєно значення 1 (один).

Оскільки розмір величини існує об'єктивно, то *числове значення величини залежить від розміру одиниці*.

Приклад 2.1. Довжина стрижня дорівнює 12 дюймів (числове значення 12) або 294 міліметра (числове значення 294), так як *12 дюймів \times 24,5 міліметра / дюйм = 294 міліметра*, тобто числове значення дорівнює 294.

Висновок, саме числове значення величини без зазначення одиниці не дає однозначного відображення розміру величини. Під час вимірювань величину можна порівнювати не тільки з розміром одиниці, але також з іншим розміром, однозначно пов'язаним з розміром одиниці.

Приклад 2.2. Довжина стержня 0,68 метра (числове значення 0,68) дорівнює 68 сантиметрам (числове значення 68) або 680 міліметрам (числове значення 680).

Тривалий час одиниці різних фізичних величин встановлювалися незалежно одні від одних. Це обмежувало взаємні стосунки між спільнотами. Щоб уникнути неоднозначності та враховуючи те, що в природі фізичні величини пов'язані між собою, в ХІХ столітті почали створювати системи одиниць. Спочатку ці системи одиниць розроблялися для певних класів фізичних величин.

У країнах світу загальноприйнята Міжнародна система одиниць фізичних величин (*Systeme Internationale d'unites, SI*), яка була прийнята ХІ Генеральною конференцією з мір та ваги (ГКМВ) (*Conferense Generale des Poids et Mesures, CGPM, ГКМВ*) в 1960 році і уточнювалася на ХІІ-ХХ ГКМВ.

Система величин – це сукупність величин, серед яких одні умовно вважаються незалежними, а інші на основі фізичних законів виражаються через них. Незалежні величини такої системи є основними, а всі інші – похідними величинами. Відповідно одиниці основних величин мають назву **основні одиниці**, а похідних величин - **похідними одиницями**.

Основною одиницею електрики і магнетизму є ампер, що дорівнює силі незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках безмежної довжини і мізерно малого кругового перерізу, які розташовані на відстані 1 м один від іншого у вакуумі, викликав би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Сукупність основних і похідних одиниць становить систему одиниць. Міжнародна система одиниць має такі переваги: невелика кількість основних одиниць (7 та 2 додаткові), основні одиниці порівняно легко відтворюються з високою точністю, основні одиниці мають такі розміри, що числові значення більшості величин виражаються не надто малими і не надто великими числами, похідні одиниці є корегентними – такими, що входять в рівняння, що пов'язують їх з іншими одиницями, з коефіцієнтом, що дорівнює одиниці.

Основні та додаткові одиниці системи наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Основні та додаткові одиниці системи одиниць

Назва величини та її розмірність	Одиниця		
	назва	позначення	
		українське	міжнародне
Основні величини			
Маса, M	кілограм	кг	kg
Час, T	секунда	с	s
Довжина, L	метр	м	m
Сила електричного струму, I	ампер	А	A
Термодинамічна температура, Θ	кельвін	К	K
Кількість речовини, N	моль	моль	mol
Сила світла, J	кандела	кд	cd
Додаткові одиниці			
Тілесний кут	стерадіан	ср	sr
Плоский кут	радіан	рад	rad

Для позначення одиниць використовуються скорочення від назв величин, причому якщо назва величини походить від прізвища, то перша буква у позначенні повинна бути великою, наприклад, ампер - A , вольт - V , ват - W , ом - Ом . У позначеннях одиниць, для яких назва величини не походить від прізвища, перша буква є малою, наприклад, метр - m , секунда - s , кілограм - kg , крапка в кінці позначення одиниці не ставиться. Одиниця, що у цілу кількість разів більша за системну одиницю, має назву *кратна одиниця*. Наприклад, 1 кілоом = 1000 Ом , 1 мегават = 10^6 Ват . Одиниця, що у цілу кількість разів менша за системну одиницю, має назву *часткова одиниця*. Наприклад, 1 сантиметр = 0,01 метра, 1 мілівольт = 0,001 вольта.

Назви та позначення деяких одиниць фізичних величин наведено в таблиці 2.3.

Одиниці системи позначаються літерами латинського, грецького (міжнародні позначення) або українського алфавітів, а також спеціальними символами біля літер.

Таблиця 2.3 - Назви ті позначення одиниць фізичних величин

Фізична величина	Позначення		Фізична величина	Позначення	
	міжнародне	українське		міжнародне	українське
ампер	A	А	люкс	lx	лк
вебер	Wb	Вб	люмен	lm	лм
вольт	V	В	метр	m	м
генрі	H	Гн	ньютон	N	Н
герц	Hz	Гц	ом	Ω	Ом
джоуль	J	Дж	паскаль	Pa	Па
калорія	cal	кал	секунда	s	с
кандела	cd	кд	сіменс	S	См
кельвін	K	К	тесла	T	Тл
кулон	C	Кл	фарада	F	Ф

Наприклад, для позначення градуса Цельсія використовується символ та літера «°C». Назви одиниць величин записують з малої літери, незалежно, чи вони походять від прізвища, чи ні, наприклад: одиниця сили струму – ампер, одиниця довжини – метр, одиниця потужності – ват, одиниця абсолютної температури – кельвін. Якісною характеристикою вимірюваної величини є її **розмірність**. Розмірність позначають символом *dim*, який є похідним від слова *dimension*.

Розмірністю основної фізичної величини є умовний символ цієї фізичної величини у цій системі величин (див. таблицю 2.2). Розмірність основних фізичних величин позначають відповідними заголовними літерами. Наприклад, розмірність часу $dim t = T$, розмірність маси $dim m = M$, розмірність сили струму $dim I = I$.

Розмірність похідної фізичної величини - це вираз, що відображає її зв'язок з основними величинами певної системи величин і дорівнює добутку розмірностей основних величин, які піднесені до відповідного степеня n_i

$$dim X = [X] = M^{n_1} \cdot T^{n_2} \cdot L^{n_3} \cdot I^{n_4} \cdot \Theta^{n_5} \cdot N^{n_6} \cdot J^{n_7} \quad (2.2)$$

Наприклад, розмірність швидкості v у системі величин L, M, T – $\dim v = L \cdot T^{-1}$.

Для формул розмірностей похідних величин використовуються такі правила:

1. Якщо значення величини C дорівнює добутку значень величини A і B , то $(C = A \cdot B)$ розмірність величини C дорівнює добутку розмірностей A і B

$$[C] = [A] \cdot [B], \quad (2.3)$$

$$\text{якщо } [A] = M^{n_1} \cdot L^{n_2} \cdot T^{n_3}, \text{ а } [B] = M^{m_1} \cdot L^{m_2} \cdot T^{m_3}, \quad (2.4)$$

$$\text{тоді розмірність } [C] = M^{n_1+m_1} \cdot L^{n_2+m_2} \cdot T^{n_3+m_3}. \quad (2.5)$$

2. Якщо значення величини C дорівнює відношенню значень величини A і B , то $(C = A \cdot B)$ розмірність величини C дорівнює відношенню розмірностей A і B

$$[C] = \frac{[A]}{[B]} = [A] \cdot [B]^{-1}, \quad (2.6)$$

$$\text{тоді розмірність } [C] = M^{n_1-m_1} \cdot L^{n_2-m_2} \cdot T^{n_3-m_3}. \quad (2.7)$$

3. Якщо значення величини C дорівнює степеню k значення величини A $(C = A^k)$, то розмірність величини C дорівнює степеню k розмірності A

$$[C] = [A]^k, \quad (2.8)$$

$$\text{тоді розмірність } [C] = M^{k \cdot n_1} \cdot L^{k \cdot n_2} \cdot T^{k \cdot n_3}. \quad (2.9)$$

Приклад 2.3 Визначити розмірність електричного заряду.

Розв'язання. Електричний заряд дорівнює добутку сили струму на час $Q = I \cdot t$, тому то згідно правила (2.3), розмірність електричного заряду буде описана виразом $\dim Q = [Q] = I \cdot T$.

Приклад 2.4 Визначити розмірність напруженості електричного поля.

Розв'язання. Напруженість електричного поля E дорівнює відношенню сили F до заряду Q , який розміщений в електричному полі, тому то згідно правила (2.6), розмірність напруженості електричного поля буде описана виразом

$$\dim E = [E] = \frac{[F]}{[Q]} = M \cdot L \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}.$$

Приклад 2.5 Визначити розмірність електричної напруги.

Розв'язання. Електрична напруга між двома точками дорівнює добутку напруженості E електричного поля на відстань l між цими точками $U = E \cdot l$, тому то згідно правила (2.6), а також розмірність напруженості електричного поля, яка була визначена в прикладі 2.4, розмірність напруги буде описана виразом

$$\dim U = [U] = [F] \cdot [l] = M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}.$$

2.3 Еталони одиниць фізичних величин

Однією із умов забезпечення єдності вимірювань є тотожність одиниць, в яких проградуєвані всі засоби вимірювальної техніки, що використовуються для вимірювання однієї і тієї самої фізичної величини. Це досягається точним відтворенням та зберіганням встановлених одиниць фізичних величин і передаванням їх розмірів відповідним засобам вимірювальної техніки. Відтворення та зберігання одиниць вимірювань для передачі їх розмірів засобом вимірювальної техніки, які застосовуються на території України, забезпечуються *державними еталонами*.

Еталон – це засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниць фізичної величини, а також передачу розміру цієї одиниці іншим засобам вимірювальної техніки.

В таблиці 2.4 наведена характеристика різних видів еталонів.

Складність різних еталонів і точність відтворюваних ними розмірів неоднакова. Вимірювання контрольованої величини передбачає прийняття за еталон одного певного значення цієї самої величини. Для того, щоб уникнути застосування занадто великої кількості еталонів, головними є лише деякі з них, які мають назву основні (базисні), а решта - похідними.

Наприклад, у механіці базисними величинами є довжина, маса та час. Одиницями, що їх описують, є метр (m), грам (g), секунда (s). Відповідно в електромагнетизмі використовуються чотири базисні величини, три з яких механічні, а четверта - електрична, а саме, електричний струм з одиницею - ампер (A).

Таблиця 2.4 - Види еталонів

Вид еталона	Характеристика
Державний еталон	це офіційно затверджений еталон, що забезпечує відтворення одиниці фізичної величини та передачу її розміру іншим еталонам з найвищою в країні точністю.
Первинний еталон	це засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення (або) зберігання одиниці фізичної величини з найвищою у країні точністю.
Спеціальні еталони	це еталон для відтворення одиниць в особливих умовах, в яких пряму передачу розміру одиниці від первинного еталона з необхідною точністю технічно здійснити неможливо.
Вторинний еталон	це еталон, якому передається розмір одиниці фізичної величини від первинного або спеціального еталона. До таких еталонів належать еталони-копія, робочі еталони та еталони передавання.
Еталон-копія	це вторинний еталон, призначений для передачі розміру одиниці фізичної величини робочим еталонам, які використовуються для метрологічної перевірки зразкових та найточніших робочих засобів.
Робочий еталон	це вторинний еталон, призначений для передачі розміру одиниці фізичної величини зразковим засобам вимірювальної техніки, а в окремих випадках робочим засобам вимірювальної техніки, та який використовується для метрологічної повірки та калібрування засобів вимірювальної техніки.
Еталон передавання	це вторинний еталон, призначений для взаємного звірення еталонів, які за тих чи інших обставин не можуть бути звірені безпосередньо.
Одиничний еталон	це одна міра, один вимірювальний прилад або одна вимірювальна установка.
Національний еталон	це еталон певної країни.
Міжнародний еталон	це еталон, що використовується у певній групі країн. Згідно з ДСТУ 2681-94 такий еталон, який за міжнародною угодою призначений для узгодження розмірів одиниць, що відтворюються і зберігаються державними (національними) еталонами.

Розроблена та впроваджена міжнародна система одиниць, яка складається з семи базисних одиниць: метр, грам, секунда, ампер, кандела, кельвін та моль, а також двох допоміжних - стерадіан та радіан. Така система забезпечує цілісну метрологічну єдність всіх сучасних галузей науки й техніки та є такою, що визнана у більшості цивілізованих країн світу. Слід відзначити, що для забезпечення єдності вимірювань у міжнародному масштабі державні еталони окремих країн періодично звіряють між собою з міжнародними еталонами, які зберігаються в Міжнародному бюро мір і ваг у Парижі.

Порівняння вимірюваної величини з умовною прийнятою одиницею є справою, що потребує багато часу. В наш час дослідниками створюються штучні еталони - зразки, а також підбираються природні явища, які достатньо точно відтворюють прийняті одиниці. Від зразків вимагається достатня стабільність конкретної величини, її відтворюваність, простота використання за допомогою методик та приладів.

Отже, основне завдання метрологічної служби держави - це пов'язування еталона й зразків усіх рангів у єдину систему, яка покликана забезпечувати метрологічну єдність виконання вимірювань з необхідною та заданою точністю.

2.4 Систематизація фізичних величин

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.

2.5 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 забез-

печують 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 2.1.

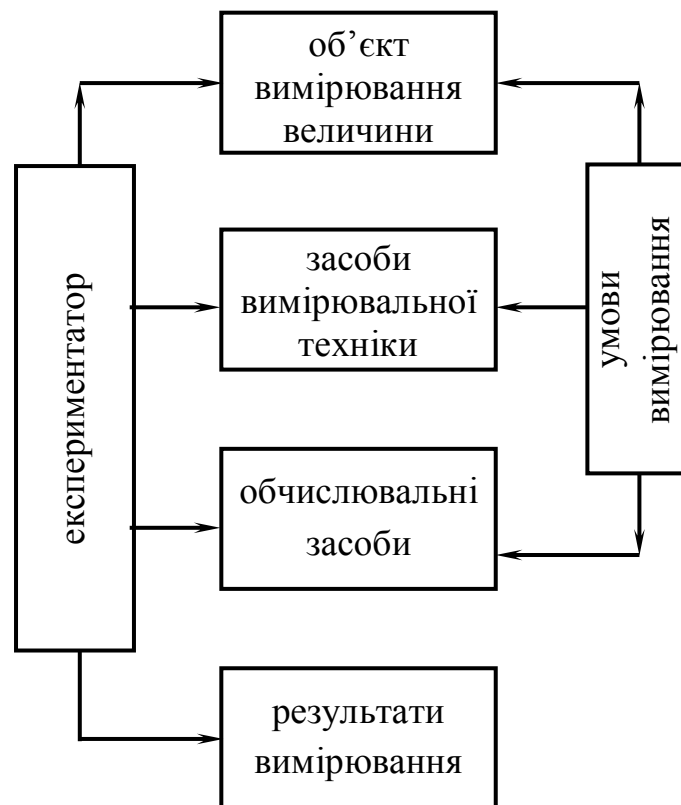


Рисунок 2.1 - Основні компоненти вимірювального процесу

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 струмами, 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 відрізнятися від розміру одиниці, тоді для можливості їх порівняння застосовують *масштабне перетворювання* 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.

2.6 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.

Вимірювання можна характеризувати з різних сторін, враховуючи їх різні класифікаційні ознаки, до яких належать:

- відсутність чи наявність в процедурі вимірювання перетворення роду вимірюваної величини та обчислення її значення за відомими фізичними залежностями;
- вид рівняння вимірювання;
- призначення вимірювання для незмінних чи змінних в часі вимірюваних величин;

- особливості визначення похибок вимірювань;
- наявність чи відсутність розмірності у вимірюваної величини;
- співвідношення між кількістю вимірюваних фізичних величин та кількістю вимірювань.

За фізичним принципом, покладеним в основу вимірювань, а також залежно від галузі науки і технології розрізняють *електричні, магнітні, механічні, акустичні, оптичні, квантові, хімічні* вимірювання.

За способом порівняння з мірою розрізняють такі вимірювання (методи): *безпосереднього оцінювання, порівняння з мірою та комбіновані*.

За способом отримання результату розрізняють *прямі та непрямі* вимірювання, які поділяються на *опосередковані, сумісні, сукупні* вимірювання.

За кількістю опрацьованих первинних результатів розрізняють *разові та багаторазові* вимірювання.

За характером взаємодії ЗВТ з об'єктом дослідження розрізняють *контактні та безконтактні*.

За характером зміни величини та показів вимірювальних засобів розрізняють *статичні та динамічні* вимірювання.

За докладністю оцінювання точності результатів вимірювання розрізняють *технічні, лабораторні, науково-дослідні та метрологічні* вимірювання.

В таблиці 2.5 наведені ознаки вимірювань.

На рисунку 2.2 наведена класифікація вимірювань.

За відсутністю чи наявністю 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.

Таблиця 2.5 - 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 2.5

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.



Рисунок 2.2 - Класифікація вимірювань

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

$$x = X_n. \quad (2.10)$$

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. Наприклад, якщо для розширення границь вимірювання амперметра застосовують вимірювальний трансформатор струму, вольтметра – вимірювальний трансформатор напруги чи подільник напруги. Результат вимірювання у такому разі є добутком масштабного коефіцієнта k_m відповідного масштабного перетворювача на показ приладу

$$x = k_m \cdot X_n. \quad (2.11)$$

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*.

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.

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.

2.7 Принцип і методи вимірювань

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

Приклад 2.6 Вимірювання магнітної індукції магнітного поля на основі ефекту Холла, а інших параметрів магнітного поля на основі застосування закону електромагнітної індукції, а також вимірювання температури на основі термоелектричного ефекту.

Залежно від принципу вимірювань вимірювання класифікують як електричні та магнітні, акустичні та оптичні, механічні та хімічні, теплові та квантові.

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, вимірювальних 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 вимірювальними приладами використовують вимірювальні перетворювачі, а саме, вимірювання сили струму за допомогою амперметра і вимірювального трансформатора струму, що застосовується для розширення гра-

ниць 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, вимірювальних перетворювачів, а значення вимірюваної величини встановлюють за показами міри при відповідному спрацюванні компаратора.

Порівняння вимірюваної величини з мірою може бути здійснене двома способами, за один раз - зіставленням ряду значень міри і вимірюваної величини (так під час вимірювання довжини $l_x = 46$ см за допомогою лінійки з поділками, компаратором служить око експериментатора – рисунок 2.3, а), або за декілька кроків - через зрівноважування вимірюваної величини послідовними значеннями міри, як під час зважування на терезах – рисунок 2.3, б).

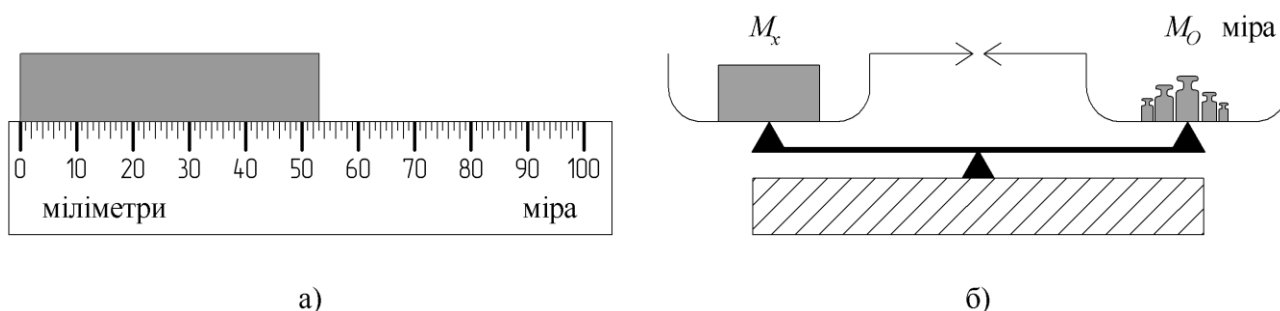
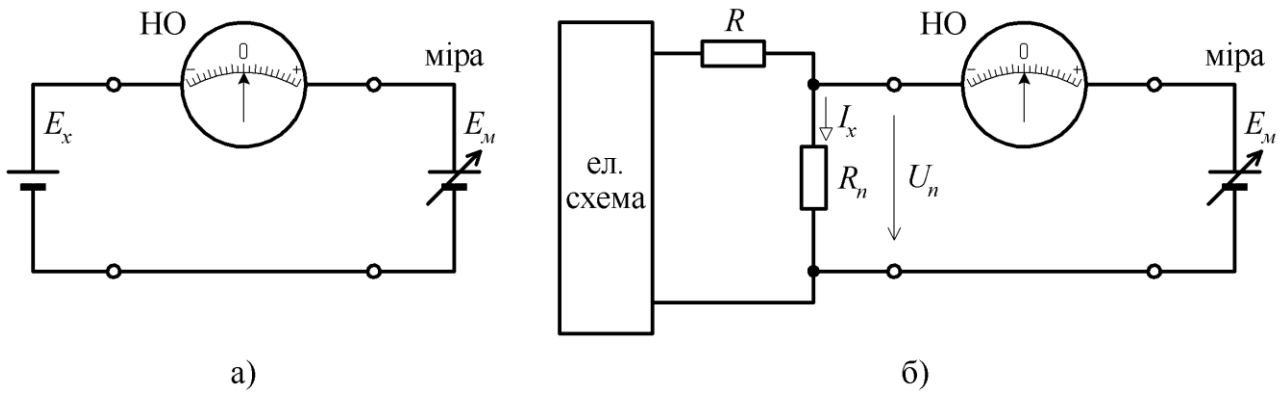


Рисунок 2.3 – Приклади вимірювань на основі методів порівняння з мірою

У методі зрівноважування вихідну величину міри залежно від вихідного сигналу компаратора змінюють доти, доки вона не буде дорівнювати значенню вимірюваної величини. За результат вимірювання величини приймається показ регульованої міри. Наприклад, на рисунку 2.4,а наведена реалізація методу порівняння з мірою зрівноважуванням для вимірювання ЕРС E_x .



а - метод зрівноважування для вимірювання ЕРС;

б - метод опосередкованого порівняння з мірою

Рисунок 2.4 – Методи вимірювань на основі метода порівняння з мірою

Регулюючи вихідну ЕРС E_m міри, досягають зрівноважування нею вимірюваної ЕРС, E_x . Факт зрівноваження встановлюють за допомогою нульового показу індикатора (НО) компаратора. За результат вимірювання приймають показ міри

$$E_x = E_m. \quad (2.12)$$

Оскільки на завершальному етапі зрівноважування забезпечується взаємна компенсація ефектів дії на компаратор як вимірюваної величини, так і величини, відтвореної мірою, то такий метод часто називають *компенсаційним методом* вимірювання. Крім того, оскільки результуючий ефект дії на компаратор обох величин під час зрівноважування доводять до нуля, то цей метод ще називають *нульовим методом* вимірювання.

Іноколи ще застосовують *метод протиставлення*, оскільки вимірювана величина і вихідна величина міри ніби протиставляються одна одній.

Однак, за своєю суттю, і *компенсаційний метод*, і *нульовий метод*, і *метод протиставлення* - це різні назви, що відображають різні сторони *методів порівняння з мірою*. Головною особливістю методів порівняння з мірою є використання для вимірювання міри, як засобу вимірювальної техніки. Її показ, а також інші метрологічні характеристики безпосередньо враховують, визначаю-

чи результат вимірювання і оцінюючи його якість: похибки вимірювання чи невизначеності результату.

Якщо вихідна величина міри і вимірювана величина однорідні, то говорять, що здійснено вимірювання *методом безпосереднього порівняння з мірою*. Реалізація цього методу вимірювання забезпечує найвищу точність вимірювання, що визначається лише точністю міри та компаратора.

Для багатьох величин створення простої та високоточної регульованої міри, а також відповідного компаратора - пристрою порівняння, є важким завданням. Тому часто вимірювану величину попередньо перетворюють за допомогою вимірювального перетворювача (вимірювальних перетворювачів) в іншу величину, для якої створення міри та пристрою порівняння не становить особливих труднощів. У такому разі можна говорити про вимірювання *методом опосередкованого порівняння з мірою*. Наприклад, вимірюючи силу постійного електричного струму I_x , можна спочатку перетворити його за допомогою зразкового (еталонного) резистора R_n , в напругу $U_x = I \cdot R_n$, яка після цього може бути виміряна безпосереднім порівнянням з мірою напруги. Результат вимірювання струму знаходять як показ міри напруги E_m , поділеної на опір резистора

$$I_x = \frac{E_m}{R_n}.$$

Точність вимірювання у такому разі визначається точністю міри, компаратора та зразкового (еталонного) резистора, тобто менша, ніж у методі безпосереднього порівняння з мірою – див. рисунок .2.4, б.

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 вимірювального 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 вимірювальної системи (кола). Один і той самий метод вимірювання може бути реалізований різними способами. Тому важливо правильно вибрати вимірювальну схему і конкретно реалізувати її, з урахуванням необхідних метрологічних характеристик засобів вимірювання;
- з вимірювального експерименту;
- з обробки результатів вимірювання, яка містить:
 - перший етап - зчитування (зняття) інформації, перетворення її в цифровий код і запис в запам'ятовувальній пристрій мікропроцесора цифрового приладу;
 - другий етап - статистична обробка результатів спостереження з оцінкою ступеня довіри;
 - третій етап - інтерпретація результатів, одержаних на другому етапі обробки.

2.8 Значущість вимірювань

Розглянемо головні аспекти значущості вимірювань.

У *філософському* аспекті значущість вимірювань визначається тим, що вимірювання є універсальним і разом із лічбою найбільш точним методом пізнання фізичних явищ і процесів. Тому метрологія, як наука про вимірювання, займає особливе місце серед інших наук, що обслуговує кожну з них та тісно переплітається з ними.

У *науці* значущість вимірювань визначається тим, що за допомогою вимірювань у фізичних науках здійснюється зв'язок науки і практики. Тому то фізики часто відносять метрологію до експериментальної фізики. Відомо, що в основі як математики, так і метрології лежить аксіома Евдокса-Архімеда про несумірні відрізки і натуральний ряд чисел, при цьому, якщо враховувати відомо-

ме визначення математики, як науки про числа і простір, то можна стверджувати, що метрологія, яка методологічно об'єднує неперервні фізичні величини і просторові з числами, то метрологія є фізико-математичною наукою.

Значущість вимірювання в *технічному* аспекті визначається тим, що вимірювання забезпечують створення кількісної вимірювальної інформації про об'єкт, без якої неможливе точне відтворення всіх заданих умов технологічного процесу, які необхідні для одержання високої якості виборів.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 2

- 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 розмірність величини? Які існують правила для формул розмірностей похідних величин?
- 10 Що таке еталон одиниць фізичних величин? Які існують види еталонів?
- 11 Що таке вимірювання? Які основні існують компоненти вимірювального процесу?
- 12 Які Вам відомі ознаки вимірювань?
- 13 Дати означення методу вимірювань.
- 14 Яке вимірювання є прямим? Навести приклади.
- 15 Яке вимірювання є непрямим? Навести приклади.
- 16 Що таке опосередковане вимірювання? Навести приклади.
- 17 Що таке сумісне вимірювання? Для чого виконуються сумісні вимірювання?
- 18 Що таке сукупні вимірювання? Для чого виконуються сукупні вимірювання?
- 19 Дати означення методу безпосереднього оцінювання.

- 20 Дати означення методу порівняння з мірою.
- 21 Що таке алгоритм вимірювання? Яке призначення алгоритму вимірювання?
- 22 Що таке методика вимірювань? Яке призначення методики вимірювань?
- 23 Охарактеризуйте значущість вимірювань.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 2

- 1 Знайти розмірність магнітного моменту M електричного контуру, як добуток сили струму I в контурі на його площу S .
- 2 Знайти розмірність густини струму J як відношення сили струму I до площі S , через яку протікає струм.
- 3 Знайти розмірність ємності C , враховуючи, що енергія, яка запасена в конденсаторі дорівнює $E = \frac{C \cdot U^2}{2}$.
- 4 Знайти розмірність електричної енергії W , як добуток сили струму I на напругу U та на час роботи t .

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 2

1 Доповніть відповідь.

Сукупність величин, серед яких одні умовно вважаються незалежними, а інші на основі фізичних законів виражаються через них, має назву ...

- 1 система величин
- 2 основні одиниці
- 3 еталони
- 4 аналогова фізична величина

2. Чи вірне твердження?

Основною одиницею електрики і магнетизму є ампер, що дорівнює силі незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках викликав би силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н?

- 1 так
- 2 ні

3 Доповніть відповідь.

... - це засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниць фізичної величини, а також передачу розміру цієї одиниці іншим засобам вимірювальної техніки.

- 1 вимірювальний прилад
- 2 вимірювальний перетворювач
- 3 еталон
- 4 міра

4 Що таке аналогова фізична величина?

- 1 це величина, що поділена на рівні за розміром частини – кванти
- 2 це величина, яка на кінцевому часовому інтервалі в заданому діапазоні набуває нескінченної кількості значень
- 3 це магнітна величина
- 4 це неелектрична величина

5. Що таке вимірювальний прилад?

- 1 засіб вимірювань, в якому реєструється сигнал вимірювальної інформації
- 2 засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації
- 3 засіб вимірювань, в якому створюється кодовий сигнал вимірювальної інформації
- 4 технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики

6. Доповніть відповідь.

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

- 1 методика виконання вимірювання
- 2 принцип вимірювання
- 3 процедура вимірювання
- 4 алгоритм виконання вимірювань

7. Суб'єкт вимірювання, який може брати безпосередню участь у виконанні вимірювального експерименту – це ...

- | | |
|-------------------|---------------|
| 1 дослідник | 3 виконавець |
| 2 експериментатор | 4 спостерігач |

8. Вимірювання, при яких засіб вимірювань має безпосередній механічний контакт з досліджуваним об'єктом, мають назву ...

- 1 разові
- 2 безконтактні
- 3 технічні
- 4 контактні

9. Вимірювання однієї величини, в якому її значення одержують безпосередньо за показом відповідного приладу, без необхідних для знаходження значення вимірюваної величини додаткових обчислень – це ...

- 1 пряме вимірювання
- 2 алгоритм вимірювання
- 3 метрологічний нагляд
- 4 непряме вимірювання

10. Вимірювання, в якому значення однієї чи декількох вимірюваних величин знаходять за результатами обчислень за відомими залежностями від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо – це ...

- 1 непряме вимірювання
- 2 метрологічна атестація
- 3 опосередковані вимірювання
- 4 сумісні вимірювання

РОЗДІЛ 3. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

3.1 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 самотійно не забезпечують одержання результату вимірювання, а лише в сукупності з іншими пристроями та засобами вимірювань.

На рисунку 3.1 наведена узагальнена класифікація засобів вимірювальної техніки.

3.2 Вимірювальні прилади

Відтворення фізичної величини – це вимірювальна операція, що полягає у створенні та (чи) зберіганні фізичної величини заданого значення. Відтворення є найважливішою операцією вимірювання, тому що визначається ступінь його досконалості - точність. Засіб відтворення фізичної величини в метрології має назву **міра**.

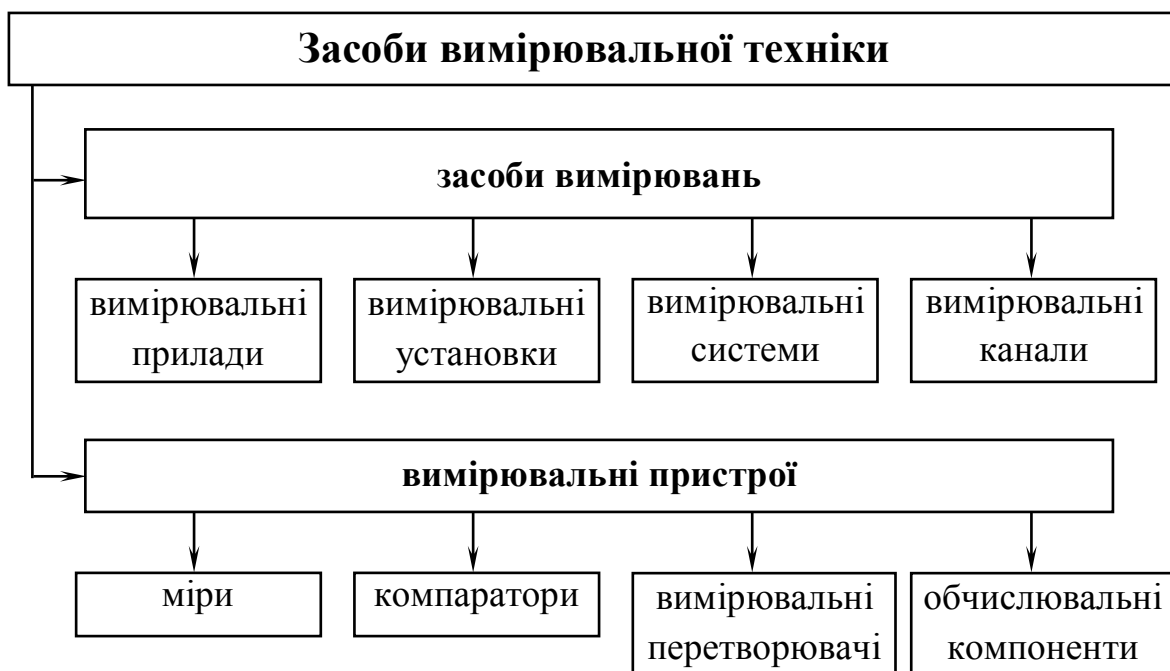


Рисунок 3.1 - Узагальнена класифікація засобів вимірювальної техніки

Міра – це вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) зберігання фізичної величини заданого розміру.

Структурна схема міри наведена на рисунку 3.2.

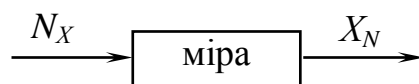


Рисунок 3.2 – Структурна схема міри

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.

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 перетворювання 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.

До вимірювального перетворювання фізичної величини належать:

- лінійне (масштабне) перетворення фізичної величини без зміни її роду;
- нелінійне перетворення фізичної величини без зміни її роду;
- лінійне перетворення фізичної величини зі зміною її роду;
- нелінійне перетворення фізичної величини без зміни її роду.

Завдяки вимірювальному перетворенню досягається узгодження роду, меж зміни і частотного діапазону сигналів.

Вимірювальний перетворювач – це вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення. Структурна схема вимірювального перетворювача наведена на рисунку 3.3.

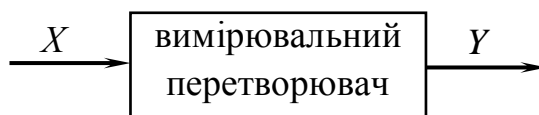


Рисунок 3.3 – Структурна схема вимірювального перетворювача

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*.

Структурна схема компаратора наведена на рисунку 3.4.

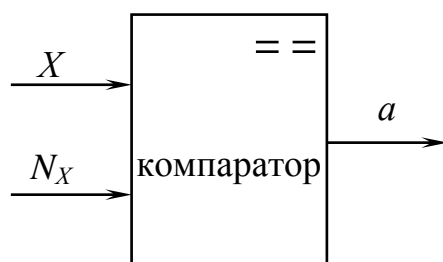


Рисунок 3.4 – Структурна схема компаратора

Такий пристрій має два входи і один вихід. На один хід « X » компаратора подається вимірювана величина X , або вихідна величина вимірювального перетворювача, а на другий вхід « X_N » – однорідна величина X_N , яка відтворена мі-

рою. 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.

3.3 Засоби вимірювання

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

показчика 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.

На рисунку 3.5 наведено структурну схему вимірювального каналу.

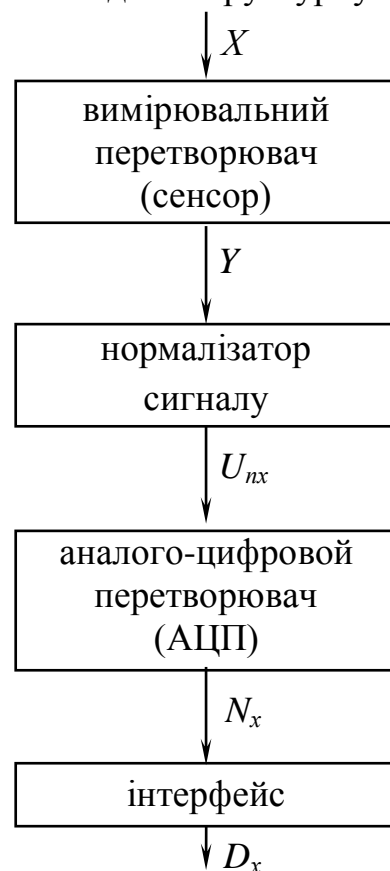


Рисунок 3.5 – Структурна схема вимірювального каналу

На рисунку 3.5 введені такі позначення: X – вимірювальна величина; Y – вихідна величина сенсора; U_{nx} – нормалізований рівень сигналу; N_x – результат аналого-цифрового перетворення; D_x – цифрові дані, що пересилаються з виходу АЦП для подальшого опрацювання, зберігання і реєстрації.

Вимірювальний канал складається з блоків:

- вимірювальний перетворювач (сенсор), який сприймає вимірювану величину і перетворює її у вихідну величину, яка придатна для подальшого перетворення та вимірювання;

- нормалізатор сигналу, в якому відбувається низка вимірювальних операцій над вихідним сигналом з сенсора для доведення його до рівня, який придатний для подальшого аналого-цифрового перетворення;

- аналого-цифровий перетворювач (АЦП), що здійснює автоматичне перетворення розміру аналогового сигналу у її цифрове значення;

- інтерфейс – це група технічних пристроїв і відповідних програм керування, які призначені для пересилання вимірювальної інформації між ЗВТ та обчислювальними, відліковими та реєструвальними пристроями.

Вимірювальна установка – це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних приладів і пристроїв та інших технічних засобів, призначених для досліджень властивостей зразків матеріалів та метрологічної перевірки 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 перевірки 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. Залежно від призначення вимірювальних систем розрізняють інформаційно-вимірювальні, контрольно-вимірювальні та діагностично-вимірювальні системи – рисунок 3.6.

Завданням інформаційно-вимірювальної системи є визначення розмірів вимірюваних величин – параметрів об'єкта, що досліджується, а також системи використовуються в наукових дослідженнях.

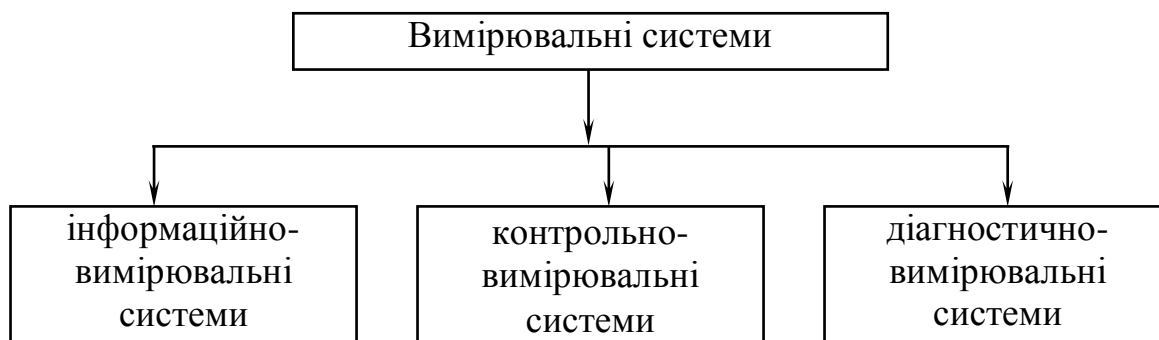


Рисунок 3.6 – Класифікація вимірювальних систем

Контрольно-вимірювальна система призначена для кількісного оцінювання параметрів стану об'єкту, що досліджується, а також дає якісну характеристику щодо стану об'єкту – відповідність об'єкту та його параметрів нормованим допустимим значенням. При виході одного чи декількох параметрів об'єкту, що характеризують його стан, за межі допустимих значень необхідно застосовувати діагностично-вимірювальну систему, яка встановить причини такого стану об'єкту. У такій системі результати діагностики отримують за допомогою відповідного збудження об'єкта, вимірювання та опрацювання його реакцій на діагностичні збудження.

3.4 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 3.7.

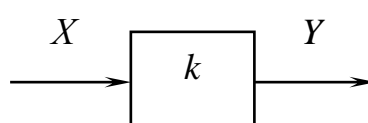


Рисунок 3.7 – Ланка структури засобу вимірювань

Як наслідок, складний, багатоетапний, розгалужений процес перетворення інформації у вимірювальному пристрої зображується графічно у вигляді *структурної схеми* або *структури вимірювального пристрою* – рисунок 3.8.

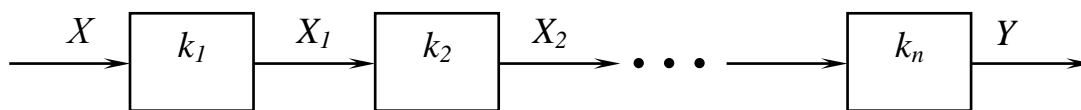


Рисунок 3.8 – Структура вимірювального пристрою (структурна схема)

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

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n. \quad (3.1)$$

Відносна похибка дорівнює сумі відносних похибок від окремих перетворювальних елементів

$$\delta = \frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta k_1}{k_1} + \frac{\Delta k_2}{k_2} + \dots + \frac{\Delta k_n}{k_n}. \quad (3.2)$$

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 3.9;

ділянка прямого перетворення



Рисунок 3.9 – Структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання слідкувального (статичного) зрівноважувального перетворення

- астатичне зрівноважування. Структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання наведена на рисунку 3.10.

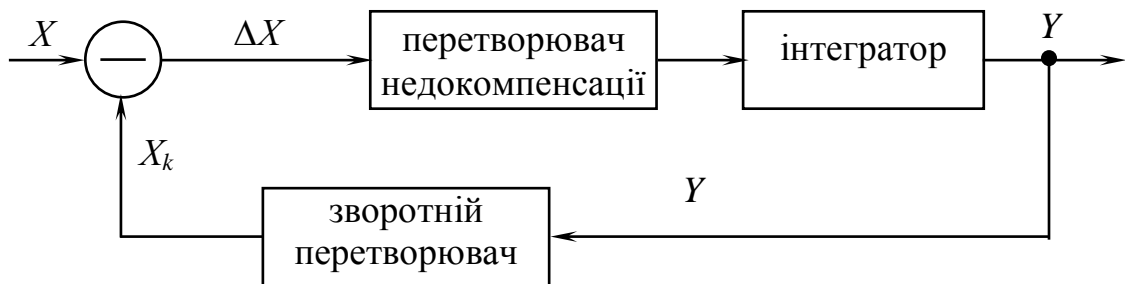


Рисунок 3.10 - Структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання астатичне зрівноважування

- розгортальне зрівноважувальне перетворення. Структурна схема засобу вимірювання наведена на рисунку 3.11. При розгортальному зрівноважувальному перетворенні вхідна величина X врівноважується компенсувальною величиною, а саме $X_k = \beta \cdot Y$ ділянки зворотного перетворення.

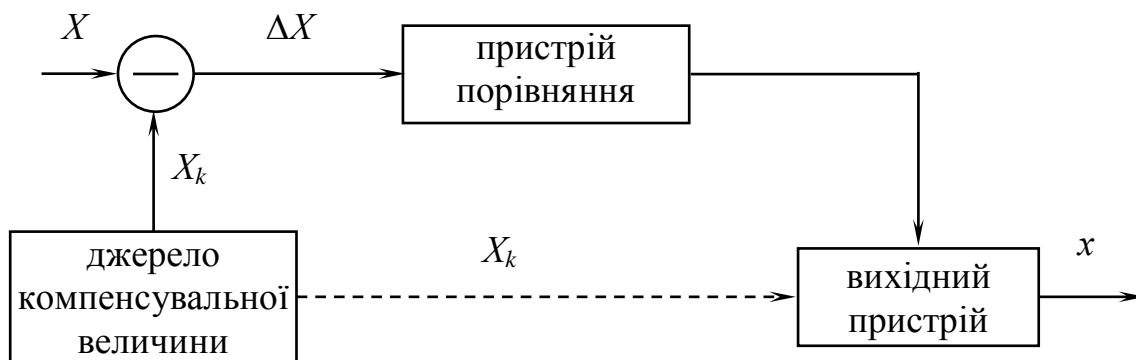


Рисунок 3.11 - Структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання розгортального зрівноважувального перетворення

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

$$K = \frac{Y}{X} = \frac{k \cdot \Delta X}{X_k + \Delta X} = \frac{k \cdot \Delta X}{k \cdot \beta \cdot \Delta X + \Delta X} = \frac{k}{1 + k \cdot \beta}. \quad (3.3)$$

Відносна похибка дорівнює

$$\delta_K = \frac{dK}{K} = \frac{1}{1 + k \cdot \beta} \cdot \delta_K - \frac{k \cdot \beta}{1 + k \cdot \beta} \cdot \delta_\beta \approx -\delta_\beta. \quad (3.4)$$

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 $X = X_k$.

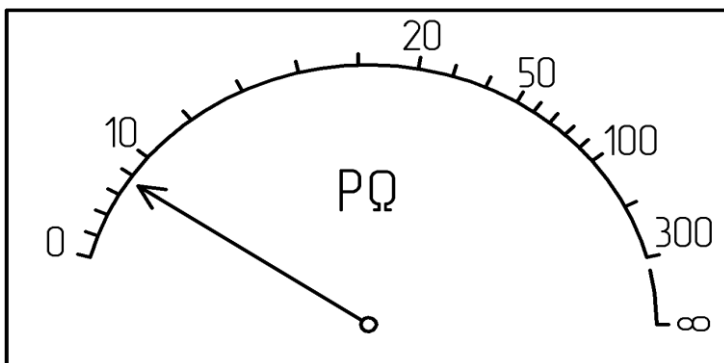
У випадку розгортального зрівноваження компенсуючу величину генерує автономне джерело компенсуючої величини, яка змінюється автоматично до тих пір, поки $\Delta X = X - X_k$ стає таким малим, що починає реагувати пристрій порівняння і подає сигнал на вихідний пристрій про те, що $X = X_k$, а джерело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

3.5 Аналогові та цифрові вимірювальні прилади

Аналогові та цифрові 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 відлік числового значення величини за шкалою приладу.

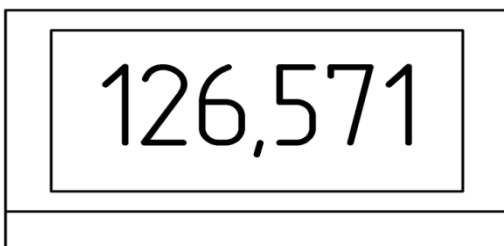
Приклад 3.3



Вимірне 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.

Приклад 3.4



Вимірне значення напруги за показаннями цифрового вольтметра дорівнює 126,571 В.

Аналогові прилади поділяються на електромеханічні та електронні.

Електромеханічний прилад складається з вимірювального кола, вимірювального механізму та пристрою відліку – рисунок 3.12.



Рисунок 3.12 – 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 3.13.



Рисунок 3.13 – 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 3.14. 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 допомо-

гою якого через дешифратор результат вимірювання подається у вигляді цифр або знаків – рисунок 3.14.

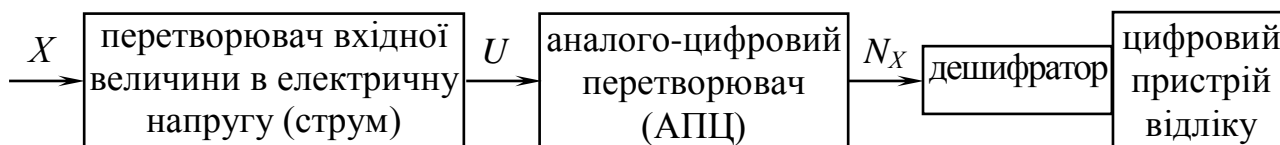


Рисунок 3.14 – Структурна схема цифрового вимірювального приладу

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.

3.6 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 застосу-

вання 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.

В таблиці 3.1 наведені розподіл усієї сукупності метрологічних характеристик ЗВТ, який містить шість груп. Слід відзначити, що для конкретного ЗВТ застосовують такі метрологічні характеристики, які необхідні для визначення результату та оцінювання точності вимірювань. Такі метрологічні характеристики для конкретного ЗВТ регламентуються Державними стандартними та нормативно-технічними документами на певний ЗВТ.

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;

Таблиця 3.1 - Складові сукупності метрологічних характеристик

Найменування групи	Складові сукупності метрологічних характеристик
1.Характеристики, за якими визначають результат вимірювання	- функція перетворення ЗВТ; - номінальне значення однозначної або номінальні значення багатозначної міри; - стала приладу (ціна поділки шкали) вимірювального приладу або багатозначної міри; - вид вихідного коду, кількість розрядів коду, одиниця молодшого розряду коду цифрових засобів вимірювань.
2.Характеристики, за якими оцінюють точність ЗВТ	- характеристики систематичної складової похибки; - характеристики випадкової складової похибки.
3.Характеристики чутливості ЗВТ до величин впливу	- функція або коефіцієнт впливу; - зміни значень метрологічних характеристик ЗВТ, які спричинені змінами величин впливу у встановлених межах.
4.Динамічні характеристики ЗВТ	Характеристики відповідають динамічному режиму роботи ЗВТ, за якого перетворювана величина є функцією часу: - часові динамічні характеристики; - частотні динамічні характеристики.
5.Характеристики взаємодії ЗВТ з об'єктами дослідження та навантаження	
6. Неінформативні параметри вихідного сигналу ЗВТ	

- **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

$$\Delta_m = X_n - X = X_n - X_0. \quad (3.5)$$

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_d , 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 3.5 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 3.15 наведена структура шкали аналогового приладу - ватметра, яка наочно пояснює такі характеристики аналогового приладу, як діапазон показів, межі (границі) та діапазон вимірювань.

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**.

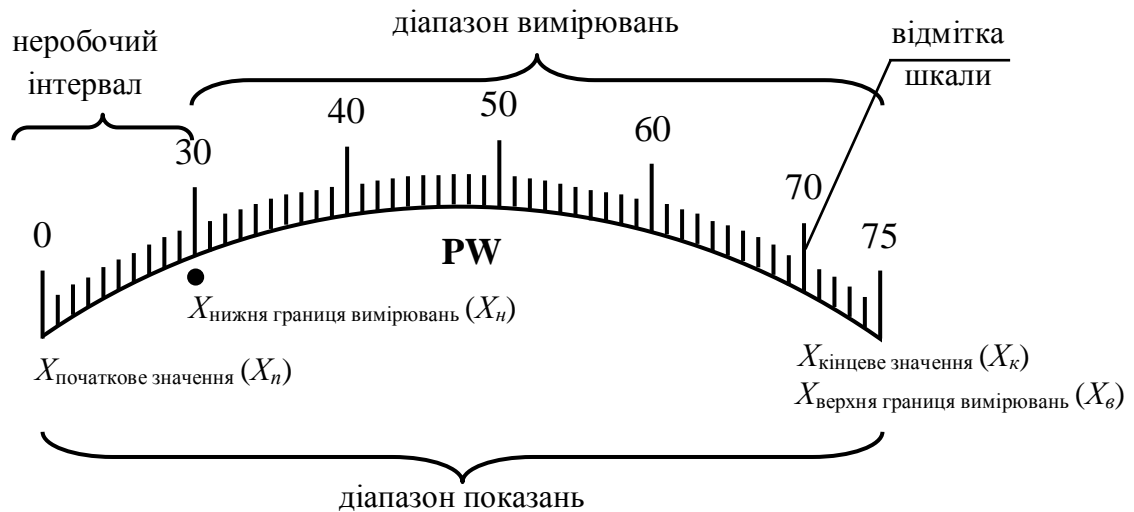


Рисунок 3.15 - Структура шкали аналогового приладу

Верхня границя вимірювання X_v практично завжди збігається з верхньою границею показів X_k ЗВ, тобто $X_v = X_k$, а нижня границя вимірювання X_n не завжди збігається з початковим значенням шкали X_p , як видно з рисунку 3.15.

Інтервал показів між позначками шкали X_n та $X_p \in$ *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 3.15:

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

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_s) – це неіменоване абстрактне число, яке зчитане з пристрою відліку або одержане підрахунком послідовних позначок чи сигналів. Найбіль-

ше число, яке можна зчитати з пристрою відліку, має назву **максимальний відлік** ($N_{B.max}$).

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

$$C = \frac{X_k}{N_{B.max}}. \quad (3.6)$$

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

$$x = N_e \cdot C = N_{nod} \cdot C_{nod}. \quad (3.7)$$

Приклад 3.5 Визначити сталу вольтметра з границею вимірювання 600 В і з максимальним відліком 150.

Розв'язання.

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

Приклад 3.6 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 $P_k = U_k \cdot I_k = 150B \cdot 5A = 750Bm$, отже, стала ватметра дорівнює

$$C_{PW} = \frac{U_k \cdot I_k}{N_{B.max}} = \frac{750}{75} = 10Bm / \text{под}.$$

Приклад 3.7 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.

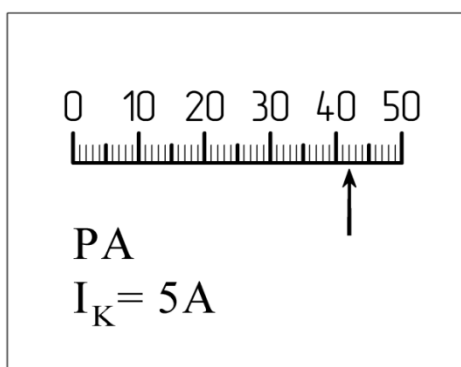


Рисунок до прикладу 3.7

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 $N_{\epsilon} = 42$; зчитана кількість поділок $N_{под} = 42$.
3. Згідно виразу (3.6) та означення ціни поділки шкали визначаємо, що стала амперметра дорівнює

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

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

4. Показ амперметра I відповідно до сталої амперметра дорівнює

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

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 ЗВ*.

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 3.2 наведені умовні позначення класів точності ЗВ з поясненням їх змісту.

Таблиця 3.2 - 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
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

$$\delta = \pm [c + d \times \left(\left| \frac{X_K}{x_{вим}} \right| - 1 \right)] \cdot 100\%. \quad (3.8)$$

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

$$x = N_x \cdot q, \quad (3.9)$$

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

$$C = C_{\text{нод}} = q. \quad (3.9)$$

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 градуювання, номінальна статична функція перетворення, коефіцієнт перетворення, чутливість та поріг чутливості (зона нечутливості) та похибки.

В таблиці 3.4 наведені означення нормованих метрологічних характеристик вимірювальних перетворювачів.

Таблиця 3.4 - Нормовані метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів

Метрологічні характеристики	Означення
Характеристика градуювання	це залежність між значеннями вимірювальної (перетворюваної) величини на виході та вході вимірювального перетворювача, визначена під час градуювання 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 $S(X) = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$

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 $[mB/^\circ C]$, 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.

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. Причиною по-

хибок вимірювальних перетворювачів є різниця між дійсною $F(X)$ та номінальною $F_{ном}(X)$ функціями перетворення, тому то на практиці абсолютна похибка за виходом визначається

$$\Delta y = y_{\partial} - y_{ном} = [k_{\partial}(X) - k_{ном}(X)] \cdot x_{\partial}, \quad (3.10)$$

де x_{∂} – дійсне значення величини, яка подана до входу вимірювального перетворювача;

y_{∂} – дійсне значення вихідної величини, виміряне на виході вимірювального перетворювача;

$y_{ном}$ – значення вихідної величини, яке знайдене за номінальною функцією перетворення $F_{ном}(X)$ перетворювача для дійсного значення вхідної величини x_{∂} ;

$k_{\partial}(X)$ – дійсний коефіцієнт перетворення;

$k_{ном}(X)$ – номінальний коефіцієнт перетворення.

Абсолютна похибка, яка приведена до входу перетворювача, визначається за формулою

$$\Delta x = x - x_{\partial} = \frac{y_{\partial}}{k_{ном}(X)} - x_{\partial}, \quad (3.11)$$

де x – значення вхідної величини, яка відповідає дійсному значенню вихідної величини y_{∂} , що знайдене за номінальною функцією перетворення вимірювального перетворювача;

$k_{ном}(X)$ – номінальний коефіцієнт перетворення.

Описані вище характеристики є статичними, тобто такими, які характеризують статичний режим роботи вимірювального перетворювача. За такий режим 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 3.4 наведені неметрологічні характеристики ЗВ та їх означення.

Таблиця 3.4 - 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.

3.7 Класифікація засобів вимірювань за метрологічними характеристиками

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, клас 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.

3.8 Класифікація похибок засобів вимірювань та їх нормування

Через недосконалість конструкції засобів вимірювання, а також через кінцеві можливості технології їх виготовлення виникають інструментальні похибки, які необхідно оцінювати кількісно в процесі експлуатації.

На рисунку 3.16 наведена класифікація похибок засобів вимірювань.

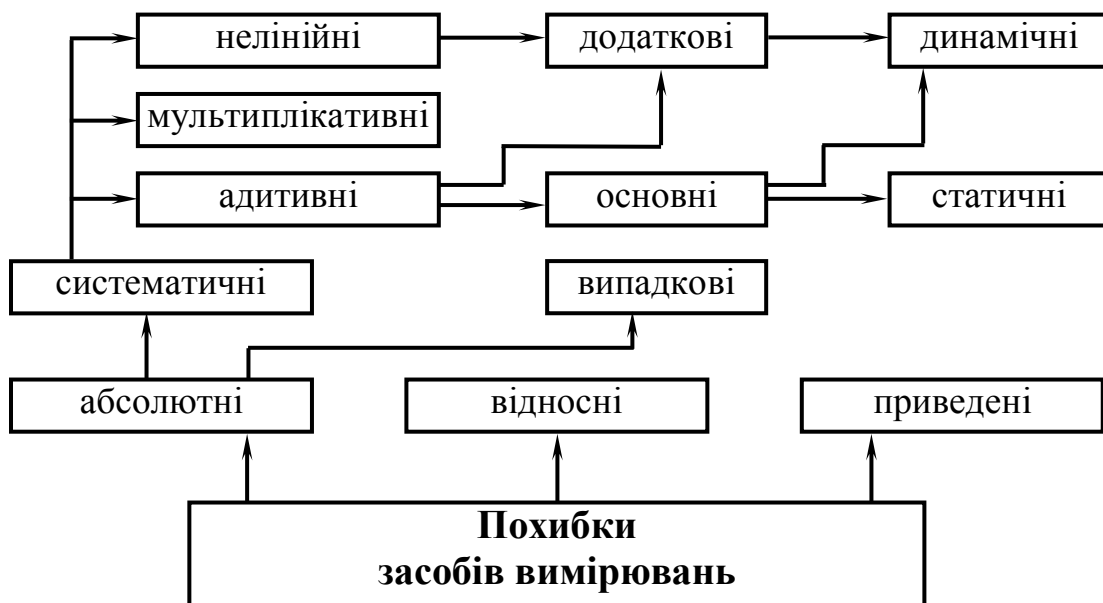


Рисунок 3.16 – Класифікація засобів вимірювань

Похибки вимірювальної техніки за способом вираження поділяють на *абсолютні, відносні та приведені*.

Абсолютна похибка ЗВ, $\Delta_{ЗВ}$ – це різниця між показом ЗВ, $X_{ЗВ}$, та істинним значенням вимірюваної величини, X_I , за відсутності методичних похибок і похибок від взаємодії ЗВ з об'єктом вимірювання. Абсолютна похибка аналітично визначається з виразом

$$\Delta_{ЗВ} = X_{ЗВ} - X_I. \quad (3.12)$$

З метою усунення методичних похибок та похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання проводиться перевірка, під час якої значення вхідної величини визначається за допомогою зразкового засобу вимірювання.

Відносна похибка ЗВ, $\delta_{ЗВ}$ – це відношення абсолютної похибки засобу вимірювань, $\Delta_{ЗВ}$, до істинного значення вимірюваної величини, X_I . Відносна похибка аналітично визначається з виразом

$$\delta_{ЗВ} = \frac{\Delta_{ЗВ}}{X_I} \cdot 100\%. \quad (3.13)$$

Приведена похибка ЗВ, γ – це відношення абсолютної похибки засобу вимірювань, $\Delta_{ЗВ}$, до нормованого значення, X_H . Приведена похибка аналітично визначається з виразом

$$\gamma = \frac{\Delta_{ЗВ}}{X_H} \cdot 100\%. \quad (3.14)$$

Залежно від умов експлуатації розрізняють *основну* і *додаткову* похибки.

Основна похибка – це похибка засобу вимірювальної техніки за нормальних умов його застосування.

Нормальні умови застосування ЗВ – це такі умови, за яких впливні величини мають нормальні значення чи знаходяться у межах нормального інтервалу значень. *Впливні величини* – це сукупність величин, які є вимірюваними, але які впливають на точність засобів вимірювальної техніки та які змінюють результати вимірювань. До таких величин належать характеристики навколишнього середовища, в якому відбуваються вимірювання та кліматичні величини: температура, вологість, тиск, магнітне поле, вібрації, радіоактивне випромінювання, а також це характеристики живлення ЗВТ, а саме, нестабільність напруги живлення та частота струму.

В таблиці 3.5 наведені нормальні умови застосування ЗВ електричних і магнітних величин. При нормальних умовах нормується основна похибка ЗВТ.

Значення впливних величин в *робочих умовах застосування* наведено в таблиці 3.6. В залежності від впливу на метрологічні характеристики температури та вологості всі ЗВТ розділені на сім груп, для кожної з яких встановлені робочі області значень впливних величин.

Якщо значення впливної величини виходить за межі нормальних значень, але знаходиться у межах робочих значень, крім основної похибки виникає ще й *додаткова інструментальна похибка ЗВТ*.

Додаткова інструментальна похибка – це похибка засобу вимірювальної техніки, яка додатково виникає під час використання засобу вимірювань в

умовах відхилення хоча б однієї з впливних величин від нормального значення або її виходу за границі нормальної зони значень.

Таблиця 3.5 - Нормальні умови застосування ЗВ електричних і магнітних величин

Найменування впливної величини	Нормальне значення або її область
Температура повітря, °С	$20 \pm 0,1; 20 \pm 0,2; 20 \pm 0,5;$ $20 \pm 20 \pm 1; 20 \pm 2; 20 \pm 5$
Відносна вологість повітря, %	30...80
Атмосферний тиск, кПа (мм рт.ст)	84...105 (630...795)
Зовнішнє магнітне поле, А/м	повна його відсутність
Частота мережі живлення, Гц	$50 \pm 0,5; 60 \pm 0,5; 400 \pm 10$
Напруга мережі живлення, В	$220 \pm 4,4; 115 \pm 2,3$
Форма кривої змінної напруги мережі живлення	синусоїдна

Додаткова похибка має назву впливної величини. Так, якщо температура середовища виходить за межі нормальної області, то додаткова похибка має назву температурна, а додаткова похибка від дії магнітного поля – магнітна похибка. За межами робочих умов застосовувати ЗВТ не допускається. Необхідно застосовувати ЗВТ з ширшою робочою областю значень певної впливної величини.

Адитивна похибка – це складова абсолютної похибки засобу вимірювальної техніки, яка не залежить від вимірюваної величини. Така похибка ще має назву *похибка нуля*.

Мультиплікативна похибка – це складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка пропорційна вимірюваній величині. Така похибка ще має назву *похибка чутливості*.

Таблиця 3.6 - Робочі умови застосування засобів вимірювальної техніки

Впливна величина	Значення впливної величини для груп ЗВТ						
	1*	2	3	4	5	6	7**
Температура повітря, °С	10...25	10...35	5...40	- 10...40 55***	- 30...50	- 50...60	- 30...70
Відносна вологість повітря, %	80 при 20°С	80 при 25°С	90 при 25°С	90 при 30°С	90**** при 30°С	95 при 35°С	80 при 30°С
Атмосферний тиск, кПа (мм рт.ст.)	84...106,7 (630...800); 60...106,7; 70...160,7 (537...800)*** (460...800)						
Зовнішнє магнітне поле, А/м	400						
Частота вимірювального сигналу, Гц	номінальна частота $\pm 10\%$ відхилення від нижньої та верхньої границь нормального діапазону відповідно на -10% та на $+10\%$						
Напруга мережі живлення, В	номінальна напруга $\pm 10\%$ відхилення від нижньої та верхньої границь нормального діапазону відповідно на -10% та на $+10\%$						
Частота мережі живлення, Гц	номінальна частота $\pm 10\%$ відхилення від нижньої та верхньої границь нормального діапазону відповідно на -10% та на $+10\%$						

Примітка до таблиці:

* - для мір, подільників напруги, вимірювальних мостів, компенсаторів;

** - для складових частин засобів вимірювальної техніки, які виготовлені за умовами групи приладів 5;

*** - для електронних вимірювальних приладів;

**** - допускається за спеціальним узгодження із споживачем встановлювати відносну вологість повітря 98% при температурі повітря 25 %.

Для оцінки похибок засобів вимірювань в процесі вимірювання призначені **нормовані значення похибок**, які є граничними для певного типу засобів вимірювань.

Метою нормування похибок ЗВТ є встановлення границь допустимих похибок, за які значення похибок не повинні виходити ні під час виготовлення ЗВТ, ні під час його експлуатації.

Границя допустимої похибки ЗВТ – це найбільше значення похибки ЗВТ, за яким цей засіб ще може бути придатним до застосування. Границі допустимих основної і додаткових похибок ЗВТ встановлюють у формі абсолютних, приведених та відносних похибок.

Такі границі допустимих абсолютних, відносних та приведених похибок ЗВ виражаються числами

$$\Delta_{ЗВ.Н} = \pm a; \quad (3.15)$$

$$\delta_H = \pm q; \quad (3.16)$$

$$\gamma_H = \pm p, \quad (3.17)$$

де a – додатне число, яке не залежить від результату вимірювань;

q, p – абстрактні додатні числа, які вибрані з метрологічного ряду $[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 6,0; 10] \cdot 10^n$ (де $n = 1; 0; -1; -2; \dots$).

Здійснимо нормування похибок засобу вимірювання - амперметра.

Приклад 3.8 Під час повірки амперметра з верхньою границею вимірювання 50 А на позначках шкали з цифрами: 10; 20; 30; 40; 50 А були отримані відповідні покази зразкового амперметра: 10,05; 20,04; 29,97; 40,02; 50,01 А. Визначити до якого класу точності можна віднести амперметр за результатами повірки при нормуванні відносної похибки.

Розв'язання.

1. Визначення абсолютних похибок Δ_{PAi} в кожній позначці шкали з цифрами

$$\begin{aligned} \Delta_{PA1} &= I_{вим1} - I_{\partial1} = 10 - 10,05 = -0,05 \text{ А}; \\ \Delta_{PA2} &= I_{вим2} - I_{\partial2} = 20 - 20,04 = -0,04 \text{ А}; \\ \Delta_{PA3} &= I_{вим3} - I_{\partial3} = 30 - 29,97 = 0,03 \text{ А}; \\ \Delta_{PA4} &= I_{вим4} - I_{\partial4} = 40 - 40,02 = -0,02 \text{ А}; \\ \Delta_{PA5} &= I_{вим5} - I_{\partial5} = 50 - 50,01 = -0,01 \text{ А}. \end{aligned}$$

2. Визначення максимального значення абсолютної похибки $\Delta_{PA.\max}$ та визначення її нормованого значення

$$\Delta_{PA.\max} = -0,05A;$$

$$a = \Delta_{PA.\max} = 0,05A.$$

3. Визначення відносних похибок δ_{PAi} в кожній позначці шкали з цифрами

$$\delta_{PA1} = \frac{\Delta_{PA1}}{I_{\partial 1}} \cdot 100\% = \frac{0,05}{10,05} \cdot 100\% = 0,5\%;$$

$$\delta_{PA2} = \frac{\Delta_{PA2}}{I_{\partial 2}} \cdot 100\% = \frac{0,04}{20,04} \cdot 100\% = 0,2\%;$$

$$\delta_{PA3} = \frac{\Delta_{PA3}}{I_{\partial 3}} \cdot 100\% = \frac{0,03}{29,97} \cdot 100\% = 0,1\%;$$

$$\delta_{PA4} = \frac{\Delta_{PA4}}{I_{\partial 4}} \cdot 100\% = \frac{0,02}{40,02} \cdot 100\% = 0,05\%;$$

$$\delta_{PA5} = \frac{\Delta_{PA5}}{I_{\partial 5}} \cdot 100\% = \frac{0,01}{50,01} \cdot 100\% = 0,02\%.$$

4. Визначення максимального значення відносної похибки $\delta_{PA.\max}$ та визначення її нормованого значення

$$\delta_{PA.\max} = 0,5\%;$$

$$q = \delta_{PA.\max} = 0,5\%.$$

5. Визначення приведених похибок γ_{PAi} в кожній позначці шкали з цифрами

$$\gamma_{PA1} = \frac{\Delta_{PA1}}{I_{HPA}} \cdot 100\% = \frac{0,05}{50} \cdot 100\% = 0,1\%;$$

$$\gamma_{PA2} = \frac{\Delta_{PA2}}{I_{HPA}} \cdot 100\% = \frac{0,04}{50} \cdot 100\% = 0,08\%;$$

$$\gamma_{PA3} = \frac{\Delta_{PA3}}{I_{HPA}} \cdot 100\% = \frac{0,03}{50} \cdot 100\% = 0,06\%;$$

$$\gamma_{PA4} = \frac{\Delta_{PA4}}{I_{HPA}} \cdot 100\% = \frac{0,02}{50} \cdot 100\% = 0,04\%;$$

$$\gamma_{PA5} = \frac{\Delta_{PA5}}{I_{HPA}} \cdot 100\% = \frac{0,01}{50} \cdot 100\% = 0,02\%.$$

6. Визначення максимального значення приведеної похибки та визначення її нормованого значення

$$\gamma_{PA.\max} = 0,1\%;$$

$$p = \gamma_{PA.\max} = 0,1\%.$$

7. Встановлення стандартного класу точності амперметра за величиною нормованого значення відносної похибки – 0,5.

Розглянемо основні випадки нормування похибок ЗВТ в залежності від співвідношення адитивної та мультиплікативної складових у похибці ЗВТ.

Випадок 1. Похибка ЗВТ носить суто адитивний характер. Так як адитивна похибка є похибкою нуля, то вона виникає внаслідок зміщення покажчика аналогових приладів з нульової позначки, а в електронних приладах – із-за зміщень нульових рівнів напруги вхідних підсилювачів. Границя абсолютної похибки $\Delta_{ЗВ}$ не залежить від вимірюваного значення і є сталою у діапазоні вимірювань ЗВТ.

Висновок: якщо похибка ЗВТ є суто адитивною, то під нормування підпадає приведена похибка.

В таблиці 3.7 наведені принципи визначення нормувального значення X_N в залежності від діапазону вимірювання та характеру шкали ЗВТ.

Таблиця 3.7 - Принципи визначення нормувального значення X_N

Характер шкали	Діапазон вимірювань	Нормувальне значення X_N та № прикладу
Рівномірна	$0 \dots X_K$	$X_N = X_K$ (приклад 3.9)
Рівномірна	$X_{K1} \dots 0 \dots X_{K2}$	$X_N = X_{K1} + X_{K2} $ (приклад 3.10)
Рівномірна	вужький діапазон вимірювання (для ЗВТ із встановленим номінальним значенням вимірювальної величини)	$X_N = X_H$; (приклад 3.11)
Істотно нерівномірна шкала	довжина шкали L_N або її частина відповідає діапазону вимірювання	$X_N = L_N$; (приклад 3.12)

Приклад 3.9 Для мікроамперметра типу Ц4209 з діапазоном вимірювання $0 \dots 200 \text{ мкА}$ нормувальне значення $X_N = I_K = 200 \text{ мкА}$.

Приклад 3.10 Для міліамперметра типу М2001 з діапазоном вимірювання $300 \dots 0 \dots 300 \text{ мА}$ нормувальне значення $X_N = |300| + |300| = 600 \text{ мА}$.

Приклад 3.11 Для частотоміра типу В80 з діапазоном вимірювання 48...58 Гц і номінальною частотою 50 Гц нормувальне значення $X_N = f_H = 50$ Гц.

Приклад 3.12 Для мегомметра типу М127 з діапазоном вимірювання 0...2 МОм і довжиною шкали 110 мм нормувальне значення $X_N = L_N = 110$ мм.

Отже, клас точності ЗВТ з адитивним характером основної похибки виражають у формі приведеної похибки, і він чисельно дорівнює границі допустимої приведеної основної похибки ЗВТ, $\gamma_{zp} = \pm \text{кл.точності, \%}$.

Так виражають клас точності аналогових вимірювальних приладів, калібраторів напруги і струму та позначають одним числом, наприклад, клас точності **0,5** (для ЗВТ з рівномірною шкалою) та клас точності **1,5** (для ЗВТ з істотно нерівномірною шкалою).

Випадок 2. Похибка ЗВТ носить суто мультиплікативний характер.

Така похибка зумовлена похибками коефіцієнтів перетворення вимірювальних перетворювачів: вимірювальних перетворювачів, подільників напруги та вимірювальних підсилювачів. Так похибка спричинена зміною чутливості елементів вимірювального кола, отже мають назву – *похибка чутливості*. Абсолютна похибка ЗВТ зростає прямо пропорційно до поточного значення вимірюваної величини, а його відносна похибка є сталою за будь-яких значень X , отже, її й використовують для нормування основної похибки ЗВТ й для позначення його класу точності. Границі допустимої відносної основної похибки δ_{zp} встановлюють за формулою

$$\delta_{zp} = \pm \frac{\Delta_{zp}}{X} \cdot 100\% = \pm q, \% = \text{const}, \quad (3.18)$$

де Δ_{zp} – границі допустимої абсолютної основної похибки;

X – значення вимірюваної величини на вході (виході) ЗВТ;

q – абстрактне додатне число, яке вибирають з метрологічного ряду $[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 6,0; 10] \cdot 10^n$ (де $n = 1; 0; -1; -2; \dots$).

Висновок: клас точності ЗВТ з мультиплікативним характером основної похибки виражають у формі відносної похибки і він чисельно дорівнює границі допустимої відносної похибки ЗВТ, $\delta_{zp} = \pm \text{кл.точності, \%}$.

Таким способом виражають клас точності масштабних вимірювальних перетворювачів, однозначних мір електричних величин і позначають одним числом, який обведений кружечком, наприклад, клас точності $\textcircled{0,5}$.

Випадок 3. Похибка ЗВТ містить як адитивну, так і мультиплікативну складові. За наявності як адитивної, так й мультиплікативної складових похибок ЗВТ під нормування підпадає відносна похибка ЗВТ.

Границі допустимої відносної основної похибки δ_{zp} встановлюють за формулою

$$\delta_{zp} = \pm \left[c + d \cdot \left(\frac{X_K}{X} - 1 \right) \right] \cdot 100\%, \quad (3.19)$$

де c та d – сталі додатні числа, виражені у відсотках;

X_K – верхня границя діапазону вимірювання (перетворення);

X – поточне значення вимірюваної (перетворюваної) величини.

Для з'ясування фізичної суті коефіцієнта c уявимо, що засіб вимірювання, границя допустимої похибки якого нормована, показав значення, яке дорівнює верхній межі вимірювання $X = X_K$. Тому то, коефіцієнт c є границею допустимої відносної похибки при максимальному показі ЗВТ, яка визначається

$$c = \pm \frac{\Delta_{zp,K}}{X_K} \cdot 100\% = \gamma_{zp,K}. \quad (3.20)$$

Для розуміння суті коефіцієнту d перетворимо формулу (3.20) так, щоб отримати залежність для визначення границі допустимої абсолютної похибки

$$\Delta_{zp} = \pm \frac{1}{100} \cdot [d \cdot X_H + (c - d) \cdot X] \quad (3.21)$$

Якщо припустити, що покази ЗВТ дорівнюють нулю $X=0$, тоді другий доданок у квадратних дужках дорівнює 0, коефіцієнт d є границею допустимої похибки при нульовому показі, яка виражена у відсотках.

$$d = \pm \frac{\Delta_{ep,H}}{X_K} \cdot 100\% = \gamma_{ep,H}. \quad (3.22)$$

Формулу (3.19) використовують для нормування похибок ЗВТ високої точності, а саме, цифрових вимірювальних приладів та багатозначних мір електричного опору.

Висновок: клас точності ЗВТ, похибка яких містить як адитивну, так й мультиплікативну складові, позначають відношенням двох чисел $c/d = \gamma_{ep,K}/\gamma_{ep,H}$. яке повинне задовольняти умові $c/d > 1$. Числа c та d вибирають з метрологічного ряду $[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 6,0; 10] \cdot 10^n$ (де $n = 1; 0; -1; -2; \dots$).

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 3

- 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?
- 11 Як класифікують похибки засобів вимірювань?
- 12 Розкрийте поняття «абсолютна похибка», «відносна похибка», «приведена похибка», «адитивна похибка», «мультиплікативна похибка» та «клас точності».

13 Що таке нормування похибок ЗВТ?

14 Охарактеризуйте основні випадки нормування похибок ЗВТ в залежності від співвідношення адитивної та мультиплікативної складових у похибці ЗВТ.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 3

1 Знайти сталу амперметра з границею вимірювання $2,5 \text{ A}$ і з максимальним відліком 100.

2 Визначити сталу та показ вольтметра з границею вимірювання $7,5 \text{ B}$ і максимальним відліком 150, якщо його показчик зупинився на позначці шкали «105».

3 Визначити сталу омметра та його показ з границею вимірювання 30 Ом і шкалою на 30 поділок, якщо усталене розташування показчика на шкалі – на позначці «20».

4 Встановити границю вимірювання і сталу міліамперметра з максимальним відліком 100, якщо при відхиленні показчика на позначку шкали «90» експериментатор зафіксував показ 45 mA .

5 За допомогою цифрового вольтметра класу точності $0,1/0,01$ з границею вимірювання $U_K = 100 \text{ B}$ експериментатор здійснив два вимірювання напруги і отримав два покази $U_1 = 70 \text{ B}$ та $U_2 = 40 \text{ B}$. Визначити граничні значення основних абсолютних та відносних похибок для цих двох випадків і зробити висновок щодо точності вимірювань.

6 Мілівольтметр має рівномірну шкалу з нульової відміткою в її середній зоні та розподілену на 50 поділок. Нижня межа вимірювання мілівольтметра $U_H = -150 \text{ мВ}$, а верхня межа $U_B = +150 \text{ мВ}$. Навести графічне зображення шкали та визначити ціну поділки. Знайти абсолютну і приведену похибки градуювання шкали мілівольтметра. Визначити величину чутливості приладу.

7 Під час перевірки електромагнітного вольтметра з верхньою границею вимірювання 300 B на кожній позначці шкали з цифрами: 50; 100; 150; 200; 250; 300 B експериментатором були отримані відповідні покази цифрового вольтметра: 43; 95; 154; 198; 251; 299,5 B . До якого класу точності належить електромагнітний

вольтметр, якщо під нормування підпадає абсолютна похибка? Побудувати графічну залежність абсолютної похибки для всіх позначок шкали з цифрами вольтметра.

8 Ватметр з верхньою границею вимірювання за напругою 150 В та з верхньою границею вимірювання за струмом 5 А і максимальним відліком шкали 150 має граничне значення абсолютної похибки $\pm 2,5 \text{ Вт}$. Визначити клас точності приладу та значення відносної похибки, якщо при вимірюванні активної потужності отримано показ 500 Вт.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) зберігання фізичної величини заданого розміру – це ...

- 1 вимірювальний перетворювач
- 2 міра
- 3 компаратора
- 4 аналоговий вимірювальний прилад

2. Вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення – це ...

- 1 міра
- 2 вимірювальний перетворювач
- 3 реєструвальний засіб вимірювання
- 4 цифровий вимірювальний прилад

3. Що таке генераторний вимірювальний перетворювач?

1 це перетворювач, в яких зміна вхідного сигналу призводить до зміни їх параметрів – опору, індуктивності, ємності та частоти

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

3 це вимірювальний перетворювач, який реалізує масштабне вимірювальне перетворення

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

4. Перетворювач, в яких зміна вхідного сигналу призводить до зміни їх параметрів – опору, індуктивності, ємності та частоти, має назву ...

- 1 генераторний вимірювальний перетворювач
- 2 числовий вимірювальний перетворювач
- 3 параметричний вимірювальний перетворювач
- 4 масштабний перетворювач

5. Доповніть відповідь.

... - це вимірювальний пристрій, що реалізує порівняння однорідних фізичних величин.

- 1 аналоговий вимірювальний прилад
- 2 компаратор (пристрій порівняння)
- 3 цифровий вимірювальний прилад
- 4 міра

6. Який перетворювач є масштабним?

1 вимірювальний перетворювач, який реалізує масштабне вимірювальне перетворення

2 це перетворювач, в яких зміна вхідного сигналу призводить до зміни їх параметрів – опору, індуктивності, ємності та частоти

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

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

7. Які характеристики засобів вимірювальної техніки є метрологічними?

1 характеристики, які впливають на результат та точність вимірювання

2 характеристики, які відображають властивості та функціонування засобів вимірювальної техніки

3 характеристики, які описують функціональний взаємозв'язок між вихідною та вхідною фізичними величинами

4 характеристики, за якими оцінюють точність засобів вимірювальної техніки

8. Що таке стала вимірювального приладу?

1 це різниця значень вимірюваної величини, що відповідає відстані між двома найближчими позначками шкали

2 це інтервал значень вимірюваної величини, який обмежений початковим і кінцевим значеннями шкали приладу

3 це найбільше число, яке можна зчитати з пристрою відліку

4 це відношення границі вимірювання приладу або максимального значення багатозначної міри до максимального показу приладу

9. Здатність засобу вимірювальної техніки зберігати свої характеристики у заданих межах за певних умов експлуатації упродовж заданого часу має назву ...

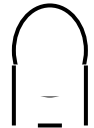
1 робото здатність засобу вимірювальної техніки

2 економічність засобу вимірювальної техніки

3 відмова засобу вимірювальної техніки

4 надійність засобу вимірювальної техніки

10. Оберіть вірне найменування умовного позначення на шкалі приладу



1 електродинамічний прилад

2 електромагнітний прилад

3 магнітоелектричний прилад

4 феродинамічний прилад

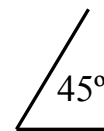
11. Оберіть вірне найменування умовного позначення на шкалі приладу

1 вертикальна установка шкали приладу

2 положення шкали під кутом

3 горизонтальна установка шкали приладу

4 орієнтація приладу в земному магнітному полі



12. Визначити сталу вольтметра, В/поділку, з границею вимірювання 600 В і з максимальним відліком 150.

1 4 В/поділку

2 4,5 В/поділку

3 3,5 В/поділку

4 0,4 поділки/В

13. Визначити величину чутливості амперметра, поділка/А, з границею вимірювання 10 А і з максимальним відліком 100.

- 1 10 А/поділку
- 2 1 А/поділку
- 3 10 поділок/А
- 4 0,1 А/поділку

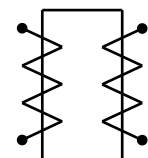
14. Визначити показ ватметра, Вт, стала якого дорівнює 5 Вт/поділку, якщо за положенням стрілочного покажчика на шкалі встановлено, що відлік дорівнює 70.

- 1 300 Вт 3 400 Вт
- 2 350 Вт 4 250 Вт

15. Визначити сталу електродинамічного ватметра, Вт/поділку, у якого границя вимірювання за напругою дорівнює 300 В, границя вимірювання за струмом - 5 А, максимальний відлік 150.

- 1 2 В/поділку
- 2 0,33 А/поділку
- 3 10 Вт/поділку
- 4 3 поділку/А

16. Оберіть вірне найменування умовного позначення на шкалі приладу



- 1 феродинамічний логометр
- 2 електромагнітний логометр
- 3 магнітоелектричний логометр
- 4 індукційний прилад

17. Розшифруйте умовне позначення класу точності **0,5/0,2**

- 1 клас точності цифрового приладу
- 2 клас точності аналогового приладу
- 3 клас точності електронного приладу
- 4 приведена похибка приладу

18. Похибка засобу вимірювальної техніки за нормальних умов його застосування є ...

- 1 основною похибкою
- 2 додатковою інструментальною
- 3 адитивною
- 4 мультиплікативною

19. За якою аналітичною формулою визначається приведена похибка засобу вимірювань?

$$1 \quad \Delta_{3B} = X_{3B} - X_I$$

$$2 \quad \delta_{3B} = \frac{\Delta_{3B}}{X_I} \cdot 100\%$$

$$3 \quad \Delta_{ep} = \pm \frac{1}{100} \cdot [d \cdot X_H + (c - d) \cdot X]$$

$$4 \quad \gamma = \frac{\Delta_{3B}}{X_H} \cdot 100\%$$

РОЗДІЛ 4. ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ

4.1 Загальні положення

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.

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 засобів вимірювальної техніки (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.

4.2 Фактори, які впливають на процес формування похибок вимірювання

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.

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.

4.3 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.

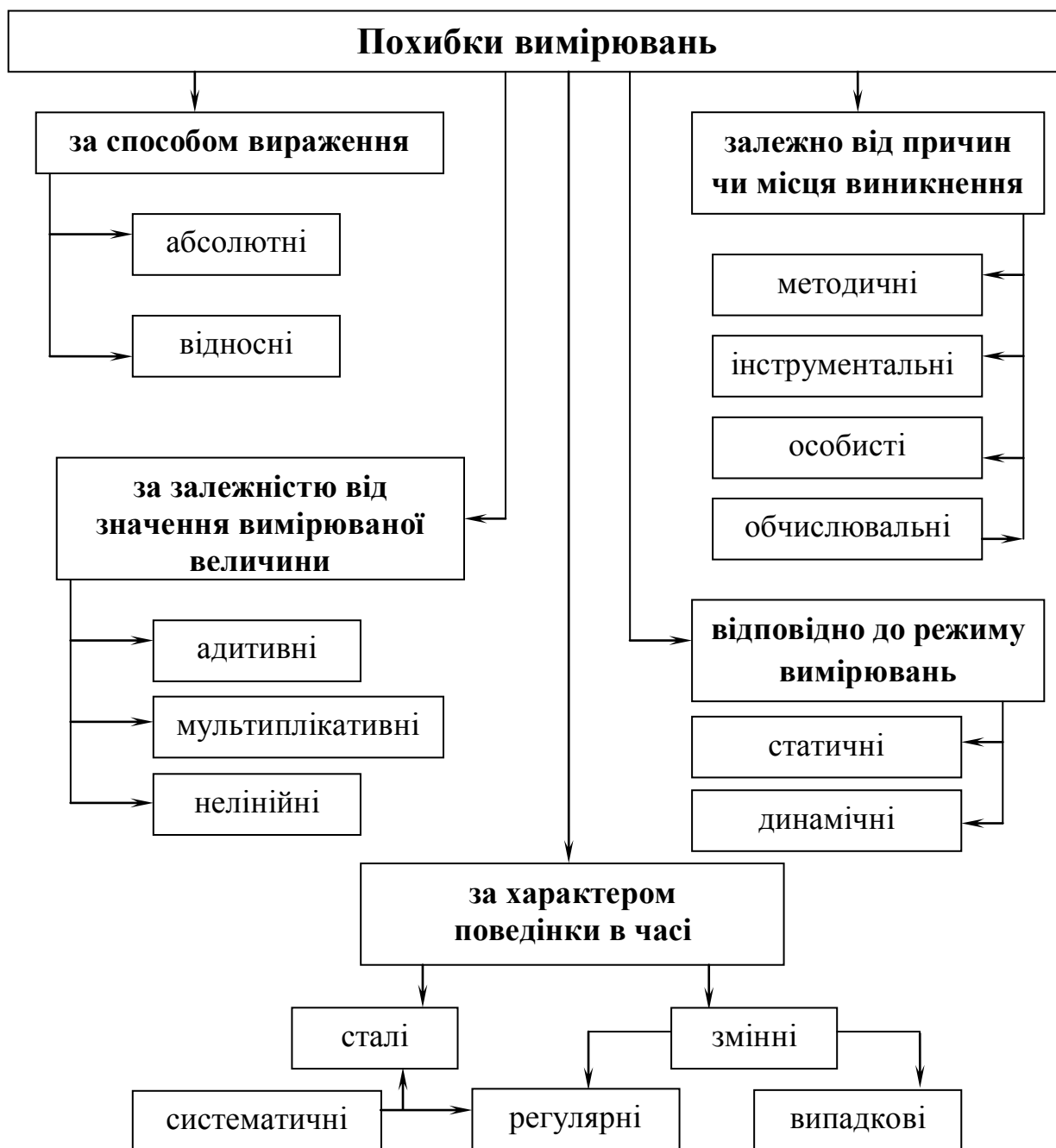


Рисунок 4.1 – Класифікація похибок вимірювань

У загальному випадку похибка результату вимірювання містить *систематичну* й *випадкові* 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.

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 вимірювального 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*.

Промачи – 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.

4.4 Абсолютна та відносна похибки вимірювання

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_I :

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

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

$$\Delta I = I - I_0 = 10,5 - 10,3 = 0,2 \text{ мА}.$$

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 $0,225 \text{ мкФ}$ з похибкою $\Delta C = 0,003 \text{ мкФ}$ і індуктивності $20,1 \text{ мГн}$ з похибкою $\Delta L = 0,15 \text{ мГн}$. 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.

4.5 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 не вилученої 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

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

- відносні

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

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 $\Delta_{zp} = \pm 0,15B$. 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

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

- відносні

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

Приклад 4.4 Абсолютна похибка амперметра, границя вимірювання якого 5 А , в режимі без калібрування може сягати значень $\pm 0,025\text{ А/місяць}$. 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 $0,025\text{ А}$ в той чи інший бік. За півмісяця слід очікувати значення систематичної похибки, не більшу, ніж половина граничного значення, саме $\pm 0,0125\text{ А}$.

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.

Якщо припустити, що систематичні похибки близькі до нуля, то найбільш достовірне значення, яке можна приписати вимірюваній величині на підставі ряду вимірювань, є середнє арифметичне з отриманих значень, що визначається як

$$x_{\text{сер}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (4.8)$$

де $x_1 \dots x_n$ – результати окремих вимірювань;
 n – кількість вимірювань.

Для оцінки точності результату вимірювань необхідно знати закон розподілу випадкових похибок.

У практиці електричних вимірювань одним з найпоширеніших законів розподілу випадкових похибок є нормальний закон Гауса. У практику такий розподіл ввів вчений Гаусс, тому його й називають гауссівським. Густина гауссівського розподілу – рисунок 4.2, має характерну дзвоно-подібну форму. За такої форми розподілу при повторних вимірюваннях менші за модулем похибки можуть виникнути частіше, ніж більші похибки.

Особливістю нормального розподілу є його стійкість, що може проявитись двояко, а саме:

- **по-перше** – алгебраїчна сума довільної кількості випадкових похибок, кожна з яких розподілена за нормальним законом, завжди має нормальний розподіл;

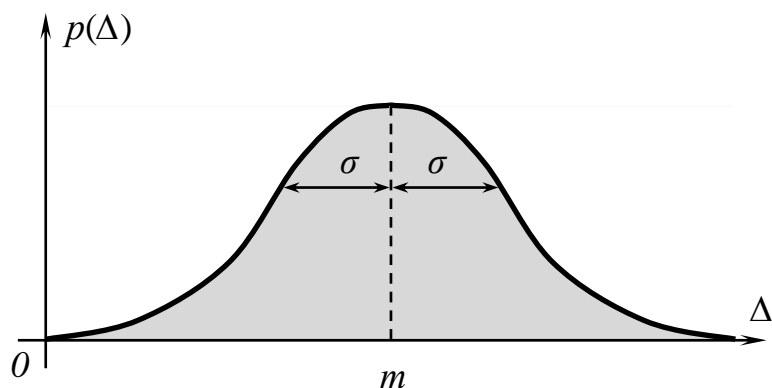


Рисунок 4.2 – Густина нормального розподілу

- *по-друге* – розподіл алгебраїчної суми великої кількості випадкових похибок з різними розподілами прямує до нормального.

Серед похибок немає таких, що явно домінують над іншими, є рівноважними, тому то при 5...6 складових розподіл їх алгебраїчної суми настільки близький до нормального, що для практичних впроваджень фактичний розподіл приймається як нормальний.

Аналітично нормальний розподіл описується виразом

$$p(\Delta) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (4.9)$$

де $p(\Delta)$ – густина ймовірності випадкової похибки Δ ;

σ – параметр розподілу – середньоквадратичне відхилення;

m – параметр розподілу – математичне сподівання похибки.

Розглянемо параметри розподілу більш детально.

Математичне сподівання, m_{Δ} , характеризує середнє значення, навколо якого групуються можливі значення похибки.

Середньоквадратичне відхилення, σ_{Δ} , характеризує ширину розсіювання значень похибки навколо середнього значення.

Зі збільшенням середньоквадратичного відхилення, σ , густина розподілу стає сплющеною до горизонтальної осі – це більше розсіювання похибок, а при зменшенні середньоквадратичного відхилення, σ , вона витягується у вертикальному напрямку – це менше розсіювання похибок. Значення густини стандар-

тного нормального розподілу ($m_{\Delta} = 0$; $\sigma_{\Delta} = 1$) можна знайти у довідковій літературі з теорії ймовірності.

Для стандартного нормального розподілу ($m_{\Delta} = 0$; $\sigma_{\Delta} = 1$) функція розподілу описується аналітичним виразом (4.10) та наведена на рисунку 4.3.

$$F(\Delta) = \int_{-\infty}^{\Delta} p(x)dx = \int_{-\infty}^{\Delta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (4.10)$$

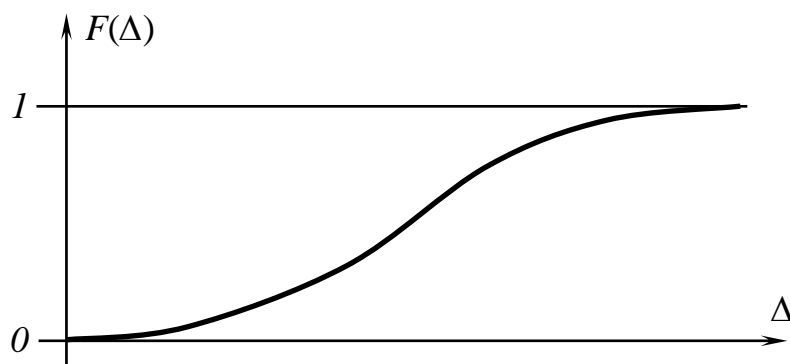


Рисунок 4.3 – Графічний вигляд функції нормального розподілу

Основними числовими характеристиками нормального закону розподілу є *математичне сподівання похибки вимірювань* та *дисперсія похибки вимірювань*.

Математичне сподівання похибки вимірювань – це не випадкова величина, відносно якої розсіюються інші значення похибки при повторних вимірюваннях, вона є характеристикою систематичної складової похибки.

Дисперсія D похибки вимірювань, – це характеристика ступеня розсіювання окремих значень похибки відносно математичного сподівання. Чим менша дисперсія, тим точніше виконано вимірювання. Отже, *дисперсія є характеристикою точності вимірювань*. Як числову характеристику точності вимірювань використовують середньоквадратичне відхилення, σ , яке зв'язане з дисперсією виразом

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{D}. \quad (4.11)$$

Випадкові величини, в тому числі і випадкові похибки, характеризуються ймовірністю. *Ймовірність випадкової величини i , випадкової похибки*, зокрема, показує, *як часто* трапляється конкретне значення Δ_i цієї величини і визнача-

ється відношенням кількості випадків n_i , коли випадкова похибка Δ приймає дане конкретне значення Δ_i , до загальної кількості N випадків

$$p(\Delta) = \frac{n_i}{N}. \quad (4.12)$$

Найбільш повною характеристикою випадкової похибки є *функція розподілу ймовірностей* і *густина ймовірностей*.

Функція розподілу ймовірностей або *закон розподілу ймовірностей* показує, яка ймовірність того, що випадкова похибка не перевищує дане значення, тобто який відсоток від загальної кількості похибок становлять похибки, які не перевищують дане значення.

Густина ймовірностей показує, як часто потрапляє випадкова величина, зокрема, випадкова похибка Δ , в заданий інтервал $[\Delta_1, \Delta_2]$ значень, і визначається відносною кількістю випадків $\frac{n_i}{N}$, коли випадкова похибка знаходиться в інтервалі $[\Delta_1, \Delta_2]$, до розміру цього інтервалу $\Delta_{12} = \Delta_2 - \Delta_1$

$$p(\Delta) = \frac{n_i / N}{\Delta_{12}}. \quad (4.13)$$

Густина ймовірностей визначається тим точніше, чим менший інтервал значень Δ_{12} задається. Якщо спрямувати інтервал Δ_{12} до нуля, то густина ймовірностей наблизатиметься до теоретичного значення.

За функцією розподілу ймовірностей та густиною ймовірностей, які несуть найбільш повну інформацію про випадкову величину, можна визначити деякі числові характеристики випадкової похибки: *довірчий інтервал* та *довірчу ймовірність*.

Довірчим інтервалом є діапазон значень випадкової похибки, у якому знаходиться із заданою ймовірністю значення випадкової похибки. Ця ймовірність має назву *довірча ймовірність*, $P_{\text{дов}}$. У метрології часто ставиться задача - за заданим значенням довірчої ймовірності знайти довірчий інтервал. Іноді це може бути обернена задача - за заданим довірчим інтервалом знайти довірчу ймовірність.

Для законів розподілу ймовірностей визначаються **довірчі границі**, які утворюють інтервал, в якому в середньому знаходиться частка $P_{\text{дов}}$ всіх можливих значень випадкової похибки – рисунок 4.4.

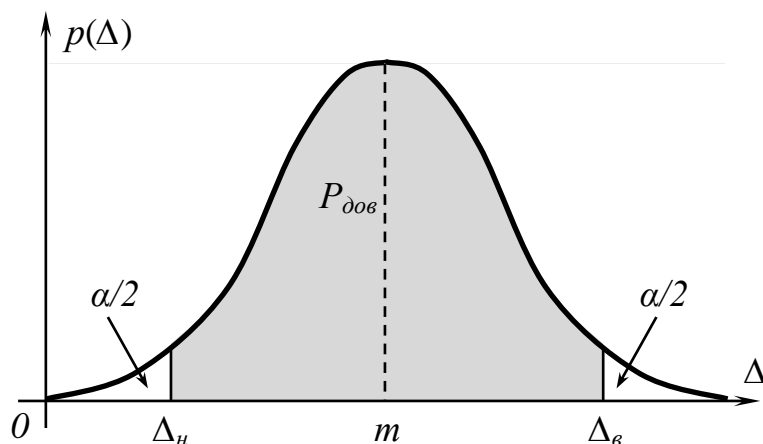


Рисунок 4.4 – Довірчі границі випадкової похибки

Довірчі границі: *верхню*, $\Delta_{B.\text{дов}}$, і *нижню*, $\Delta_{H.\text{дов}}$, розраховують теоретично як значення похибок, за яких функція розподілу похибки досягає симетричних значень

$$F(\Delta_H) = \frac{1 - P_{\text{дов}}}{2} = \frac{\alpha}{2}; \quad (4.14)$$

$$F(\Delta_B) = 1 - \frac{1 - P_{\text{дов}}}{2} = \frac{1 + P_{\text{дов}}}{2} = 1 - \frac{\alpha}{2}, \quad (4.15)$$

де α – ймовірність (ризик) виходу похибки за межі довірчих границь

$$\alpha = 1 - P_{\text{дов}}. \quad (4.16)$$

У практиці вимірювань прийняті такі типові значення довірчої ймовірності $P_{\text{дов}} = 0,90$; $P_{\text{дов}} = 0,95$; $P_{\text{дов}} = 0,99$; $P_{\text{дов}} = 0,9973$, для яких ймовірність α виходу випадкової похибки за довірчі границі становить 0,1; 0,05; 0,01 та 0,0027 відповідно.

У разі стандартного нормального розподілу ($m_A = 0$; $\sigma = 1$) довірчі границі для різних довірчих ймовірностей набувають таких значень, що наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Довірчі границі для різних довірчих ймовірностей

Довірча ймовірність, $P_{дов}$	Довірчі границі, $\Delta_{дов}$	Квантиль стандартного нормального розподілу, $z(P_{дов})$
0,90	$\cong 1,65$	$z(0,90)$
0,95	$\cong 1,96$	$z(0,95)$
0,99	$\cong 2,58$	$z(0,99)$
0,9973	$\cong 3$	$z(0,9973)$

Квантиль стандартного нормального розподілу – це коефіцієнт, який визначає границі, в межах яких знаходиться частка довірчої ймовірності випадкових похибок.

Розглянемо як, у загальному випадку, для нормального розподілу з ненульовим центром розподілу ($m_{\Delta} \neq 0$) та відмінним від одиниці стандартним середньоквадратичним відхиленням ($\sigma_{\Delta} \neq 1$) довірчі границі похибки при заданій довірчій ймовірності визначаються з використанням вказаних значень і відповідного квантилю стандартного нормального розподілу.

Верхня довірча границя, $\Delta_{B.дов}$, визначається за виразом

$$\Delta_{B.дов} = m_{\Delta} + z(P_{дов}) \cdot \sigma_{\Delta}. \quad (4.17)$$

Нижня довірча границя, $\Delta_{H.дов}$, визначається за виразом

$$\Delta_{H.дов} = m_{\Delta} - z(P_{дов}) \cdot \sigma_{\Delta}. \quad (4.18)$$

Приклад 4.5. Випадкова похибка має нормальний розподіл з такими параметрами: $m_{\Delta} = 7,5$ мВ; $\sigma_{\Delta} = 5,6$ мВ. Визначити довірчі границі випадкової похибки для довірчих ймовірностей $P_{дов} = 0,90$ та $P_{дов} = 0,95$.

Розв'язання. 1. У відповідності з означенням параметр нормального розподілу m_{Δ} є математичним сподіванням, а параметр σ_{Δ} є стандартним середньоквадратичним відхиленням.

2. З таблиці 4.1 для заданих довірчих ймовірностей $P_{дов} = 0,90$ та $P_{дов} = 0,95$ визначаємо значення квантилей стандартного нормального розподілу: $z(0,90) = 1,65$; $z(0,95) = 1,96$.

3. За виразами (4.16) та (4.17) довірчі границі випадкової похибки дорівнюють

$$\Delta_{B.\text{до\textcircled{0,9}}} = 7,5 + 1,65 \cdot 5,6 = 7,5\text{мВ} + 9,24\text{мВ};$$

$$\Delta_{H.\text{до\textcircled{0,9}}} = 7,5 - 1,65 \cdot 5,6 = 7,5\text{мВ} - 9,24\text{мВ};$$

сумісно

$$\Delta_{\text{до\textcircled{0,9}}} = 7,5 \pm 1,65 \cdot 5,6 = 7,5\text{мВ} \pm 9,24\text{мВ};$$

$$\Delta_{B.\text{до\textcircled{0,95}}} = 7,5 + 1,96 \cdot 5,6 = 7,5\text{мВ} + 10,98\text{мВ};$$

$$\Delta_{H.\text{до\textcircled{0,95}}} = 7,5 - 1,96 \cdot 5,6 = 7,5\text{мВ} - 10,96\text{мВ};$$

сумісно

$$\Delta_{\text{до\textcircled{0,95}}} = 7,5 \pm 1,96 \cdot 5,6 = 7,5\text{мВ} \pm 10,98\text{мВ}.$$

Якщо існує декілька випадкових похибок $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3 \dots \Delta_n$ з математичним сподіванням $m_1, m_2, m_3 \dots m_n$ та дисперсіями $D_1, D_2, D_3 \dots D_n$, то у теорії випадкових похибок доведено, що математичне сподівання має такі властивості:

- *математичне сподівання алгебраїчної суми як незалежних, так і залежних випадкових похибок дорівнює алгебраїчній сумі їх математичних сподівань*

$$\begin{aligned} M[\Delta_1 \pm \Delta_2 \pm \Delta_3 \pm \dots \pm \Delta_n] &= \\ &= M[\Delta_1] \pm M[\Delta_2] \pm M[\Delta_3] \pm \dots \pm M[\Delta_n] = m_1 \pm m_2 \pm m_3 \pm \dots \pm m_n; \end{aligned} \quad (4.19)$$

- *математичне сподівання добутку невідповідної величини X на випадкову похибку Δ дорівнює добутку цієї величини на математичне сподівання m_Δ випадкової похибки*

$$M[X \cdot \Delta] = X \cdot M[\Delta] = X \cdot m_\Delta. \quad (4.20)$$

Дисперсія незалежних випадкових величин має інші властивості:

- *дисперсія алгебраїчної суми незалежних випадкових величин дорівнює сумі їх дисперсій*

$$D[\Delta_1 \pm \Delta_2 \pm \Delta_3 \pm \dots \pm \Delta_n] = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n. \quad (4.21)$$

- дисперсія добутку не випадкової величини X на випадкову похибку Δ дорівнює добутку квадрату цієї величини на дисперсію D_{Δ} випадкової похибки

$$D[X \cdot \Delta] = X^2 \cdot D_{\Delta}. \quad (4.22)$$

Для нормально розподілених похибок їх сума завжди має нормальний розподіл, тому то після визначення математичного сподівання і стандартного відхилення сумарної похибки стає можливим визначення довірчих границь такої похибки за аналітичним виразом

$$\Delta_{\text{дов}} = m_{\Delta} \pm z(P_{\text{дов}}) \cdot \sigma_{\Delta} = m_{\Delta} \pm z(P_{\text{дов}}) \cdot \sqrt{D_{\Delta}}. \quad (4.23)$$

Приклад 4.6. Відомі параметри нормального розподілу трьох складових випадкової похибки вимірювання опору: $m_1 = 0,26 \text{ Ом}$, $\sigma_1 = 0,38 \text{ Ом}$; $m_2 = -0,35 \text{ Ом}$, $\sigma_2 = -0,43 \text{ Ом}$; $m_3 = 0,13 \text{ Ом}$, $\sigma_3 = 0,26 \text{ Ом}$.

Знайти математичне сподівання, дисперсію та стандартне відхилення сумарної похибки. Розрахувати довірчі границі похибки для $P_{\text{дов}} = 0,95$.

Розв'язання. Математичне сподівання сумарної похибки дорівнює алгебраїчній сумі математичних сподівань складових

$$m_{\Delta} = m_1 + m_2 + m_3 = 0,26 - 0,35 + 0,13 = 0,04 \text{ Ом}.$$

Дисперсія суми незалежних похибок дорівнює сумі їх дисперсій, а останні для нормального розподілу дорівнюють квадрату стандартного відхилення, тому

$$D_{\Delta} = D_1 + D_2 + D_3 = [0,38^2 + 0,43^2 + 0,26^2] = 0,3969 \text{ Ом}.$$

Стандартне відхилення сумарної похибки дорівнює квадратному кореню з дисперсії $\sigma_{\Delta} = \sqrt{D_{\Delta}} = \sqrt{0,3969} = 0,63 \text{ Ом}$.

Для $P_{\text{дов}} = 0,95$ квантиль нормального розподілу $z(0,95) = 1,96$.

Довірчі границі сумарної похибки дорівнюють

$$\Delta_{\text{дов}} = 0,04 \text{ Ом} \pm 1,96 \cdot 0,63 \text{ Ом} \equiv 0,04 \text{ Ом} \pm 1,23 \text{ Ом}.$$

4.6 Виявлення та виключення систематичних похибок

Обов'язковим елементом опрацювання результатів вимірювання є виявлення і коригування систематичних похибок. Виявлення систематичних похи-

бок 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 *не вилученою систематичною похибкою*.

4.7 Опрацювання результатів вимірювання

Після проведення вимірювальних експериментів здійснюється опрацювання результатів вимірювань з метою визначення результату вимірювання, тобто кінцевої мети вимірювання. При опрацюванні результатів оператору необхідно розв'язати дві задачі:

- знайти найкращу оцінку значення вимірюваної величини;
- оцінити характеристики точності вимірювання у вигляді характеристик похибки чи невизначеності (непевності) результату вимірювання.

Результат вимірювання є лише тоді повноцінним, коли він супроводжується оцінкою його точності. Обсяг опрацювання результатів вимірювань залежить від виду вимірювань, від кількості отриманих експериментальних даних, вимог щодо точності вимірювань, від апріорної інформації про систематичні та випадкові похибки вимірювань.

При прямих разових вимірюваннях результат спостереження є результатом вимірювань, і лише за умови, що систематичні похибки вимірювань не коригують.

При сукупних і сумісних вимірюваннях обов'язковим є розв'язування систем рівнянь методом найменших квадратів.

Основні операції опрацювання результатів вимірювань:

- попередній аналіз результатів спостережень, їх систематизація, відкидання явно недостовірних;
- виявлення та коригування систематичних ефектів, а саме, вивчаються умови вимірювань, розраховуються та вносяться поправки;
- виконання розрахунків згідно пунктів алгоритму опрацювання;
- аналіз випадкових ефектів, перевірка гіпотез про їх розподіл;
- оцінювання похибок від впливу завод;
- оцінювання характеристик похибок числового алгоритму та його стійкості;
- підсумовування складових похибок результатів;
- аналіз отриманих результатів;
- подання за відповідною формою результатів вимірювань та характеристик їх точності.

Кожен вид вимірювань має свої особливості, тому то зміст вищеназваних операцій опрацювання результатів кожного виду відрізняється. Розглянемо суть *нехтування похибками*. Серед складових похибок під час оцінювання можуть виникати як більші, а також й менші та дуже малі, які практично не змінюють оцінки сумарної похибки. Такими похибками необхідно знехтувати. При використанні апріорної інформації та інформації експериментів неможливо не тільки абсолютно точно встановити значення вимірюваної величини, але й неможливо точно оцінити характеристики похибок чи непевності результату вимірювання. Слід зауважити, що термін «*непевність*» результату вимірювання (з оригінального терміна з англійської «*uncertainty*») є у змістовому плані по суті *недостовірністю* (*сумнівністю*) результату вимірювання.

У метрологічній практиці при високоточних вимірюваннях непевність оцінювання похибки складає 5% ($p_n = 1/20$) від її значення і навіть менше, при лабораторних вимірюваннях непевність оцінювання похибки може досягати 10%...15% ($p_n = 1/10 \dots 1/7$) від її значення, а при технічних вимірюваннях – 20% ($p_n = 1/5$). Як наслідок, можна встановити умову $p = \Delta_2 / \Delta_1$ нехтування малою похибкою Δ_2 порівняно з більшою похибкою Δ_1 , за якої сумарна похибка наближено дорівнює більшій $\Delta = \Delta_2 + \Delta_1 \cong \Delta_1$. Але для різних характеристик похибок і вимірювань така умова буде різною.

Умова нехтування систематичними похибками має вигляд

$$p = \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \leq p_n. \quad (4.24)$$

Як наслідок, систематичною похибкою можна знехтувати, якщо вона не перевищує:

- $p \approx 1/20$ від іншої (для високоточних вимірювань);
- $p \approx 1/(7-10)$ від іншої (для лабораторних вимірювань);
- $p \approx 1/5$ від іншої (для технічних вимірювань).

Постає проблемне запитання «Якими складовими похибки вимірювання можна знехтувати, а якими ні?».

Відповідь можна надати таку: ще до виконання вимірювального дослідження для кожної складової похибки оцінюють її найбільше можливе значення, яке вона може набути у найнесприятливіших умовах вимірювального експерименту.

Приклад 4.7. При лабораторних дослідженнях систематична похибка вимірювання температури містить чотири складові $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4$. На першому етапі планування та аналізу похибок вимірювань температури було встановлено, що в найгіршому випадку $\Delta_1 \leq \pm 0,53 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta_2 \leq \pm 0,31 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta_3 \leq \pm 0,72 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta_4 \leq \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Завданням є перевірка умови нехтування найменшої похибки.

Розв'язання.

У найгіршому випадку сума перших трьох складових становить

$$\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \leq \pm(0,53 + 0,31 + 0,72)^\circ C = \pm 1,56^\circ C .$$

Відношення граничного значення четвертої найменшої складової до граничного значення суми перших трьох становить $p = 0,1^\circ C / 1,56^\circ C \approx 1/11$.

Отже, встановлено, що четверту складову похибки вимірювання температури можна не враховувати, так як в найгіршому випадку вона не перевищує 1/11 від суми трьох інших складових похибки.

Після порівняння її з іншими похибками приймається рішення про нехтування похибкою чи про її залишення. Після проведення експерименту і оцінювання відповідних похибок може статися так, що деякі складові похибок є достатньо малими порівняно з іншими. Але немає сенсу ними нехтувати, так як були затрачені зусилля для оцінювання їх значень.

Отже, при визначенні характеристики сумарної похибки слід враховувати всі складові, що залишилися після попереднього аналізу, а сенс нехтування похибками полягає у тім, що слід ще на попередньому етапі встановити які складові похибок будуть незначними у найнесприятливіших умовах, тобто ними необхідно знехтувати і не витратити зусиль для їх оцінювання після виконань вимірювань.

При опрацюванні результатів вимірювань здійснюють заокруглення результатів до того самого розряду, до якого заокруглена абсолютна похибка, тобто одиниця останнього розряду прикінцевої заокругленої похибки та результату мають бути однакові. Результат вимірювання подається як заокруглене його числове значення разом з характеристиками його точності, а також наявність одиниці величини. Так, для разового вимірювання за відсутності інформації щодо характеристики складових похибки результат вимірювання має вигляд

$$X = (x \pm \Delta_{ep}), \quad (4.25)$$

де X - фізична величина;

x - числове значення результату заокруглене за правилами;

$\pm \Delta_{ep}$ - граничні значення (заокруглені) похибки результату.

Приклад 4.8.

Записати результат вимірювань струму при лабораторних дослідженнях згідно правил заокруглення, якщо значення струму дорівнює $I = 3,648 \text{ мА}$, а оцінка граничної похибки при його вимірюванні дорівнює $\Delta_{zp} = \pm 0,079 \text{ мА}$.

Розв'язання.

Так як перша значуща цифра похибки 7, то похибка заокруглюється до однієї значущої цифри, а саме, $\Delta_{zp} = \pm 0,08 \text{ мА}$. Результат вимірювання струму також слід заокруглити так, щоб він закінчувався таким самим розрядом, що й похибка (до сотих міліампера): $I = (3,65 \pm 0,08), \text{ мА}$.

Якщо модель похибки вимірювання описується як алгебраїчна сума декількох складових, то кожна з них впливає на сумарну похибку через коефіцієнт впливу c_i

$$\Delta = c_1 \cdot \Delta_1 + c_2 \cdot \Delta_2 + \dots + c_n \cdot \Delta_n = \sum_{i=1}^n c_i \cdot n_i. \quad (4.26)$$

Цими складовими можуть бути як самі невідомі систематичні похибки, так і їх не скориговані залишки. Тому то виникає проблема оцінювання характеристик сумарної похибки, якщо відомі характеристики складових.

Якщо систематична похибка складається з чотирьох (n 'яти) складових, то необхідно визначати верхню оцінку похибки вимірювання як безумовне граничне її значення, для чого обчислюється сума граничних похибок аргументів, які помножені на модулі коефіцієнтів впливу $|c_i|$

$$\Delta_{zp} = \pm (|c_1| \cdot |\Delta_{1zp}| + |c_2| \cdot |\Delta_{2zp}| + \dots + |c_n| \cdot |\Delta_{nzp}|) = \pm \sum_{i=1}^n |c_i| \cdot |\Delta_{izp}|. \quad (4.27)$$

Результат вимірювання записується у вигляді

$$Y = (y \pm \Delta_{zp}) \quad (4.28)$$

Приклад 4.9.

При вимірюванні напруги $U = 103,386 \text{ В}$ похибка складається з чотирьох систематичних складових $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4$, граничні значення яких знайдені попереднім оцінюванням

$$\Delta_{1ep} = \pm 0,0138 мВ; \Delta_{2ep} = \pm 0,0245 мВ; \Delta_{3ep} = \pm 0,0119 мВ; \Delta_{4ep} = \pm 0,0337 мВ.$$

Оцінити граничне значення сумарної систематичної похибки і навести результат вимірювання.

Розв'язання.

Коефіцієнт впливу всіх складових дорівнює $c_i = 1$ (де $i = 1 \dots 4$), так як складові похибки входять в сумарну похибку безпосередньо.

Граничне значення сумарної систематичної похибки дорівнює

$$\Delta_{ep} = \pm \sum_{i=1}^n |c_i| \cdot |\Delta_{iep}| = \pm (0,0138 + 0,0245 + 0,0119 + 0,0337) = \pm 0,0839 мВ.$$

Граничне значення похибки заокруглюємо до однієї значущої цифри $\Delta_{ep} = \pm 0,08 мВ$. Результат вимірювання заокруглюємо до сотих часток мілівольта і записуємо $U = (103,4 \pm 0,08), мВ$.

Якщо систематична похибка складається більш, ніж чотирьох (п'яти) складових, то для визначення похибки використовують *квазістатистичний метод розрахунку*, який дає реалістичну оцінку похибки, а саме довірчу похибку. Довірчі границі оцінюються за виразом з урахуванням значень дисперсій окремих складових σ_i^2

$$\Delta_{c.дов} = \pm K(P_{дов}, n) \sqrt{c_1^2 \cdot \sigma_1^2 + c_2^2 \cdot \sigma_2^2 + \dots + c_n^2 \cdot \sigma_n^2} = \pm K(P_{дов}, n) \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot \sigma_i^2} \quad (4.29)$$

де $K(P_{дов}, n)$ – коефіцієнт, що залежить від довірчої ймовірності $P_{дов}$, від розподілу складових та їх кількості n .

Для реалізації вищеназваного методу необхідно мати інформацію щодо можливих складових, а саме, про їх дисперсії. Така інформація отримується на основі досліджень складових похибки, як наслідок, робиться висновок про інший розподіл систематичної похибки. Дослідники роблять узагальнений висновок, що похибка певного засобу вимірювальної техніки, що використовується у дослідженнях, є конкретною реалізацією можливих значень, які характерні для цілої сукупності засобів вимірювальної техніки такого типу.

У разі відсутності інформації про розподіл похибки з урахуванням її граничних значень $\Delta_{i\text{ep}}$ приймається її рівномірний розподіл, а похибки при цьому носять найбільшу непевність результату.

Стандартне відхилення окремих складових дорівнює

$$\sigma_i = \frac{\Delta_{i\text{ep}}}{3}. \quad (4.30)$$

Довірчі границі оцінюються за виразом

$$\Delta_{c.\text{доє}} = \pm \frac{K(P_{\text{доє}}, n)}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot \sigma_i^2} = K(P_{\text{доє}}, n) \cdot S_c, \quad (4.31)$$

де S_c – оцінка стандартного відхилення суми систематичних похибок.

$$S_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot \sigma_i^2} / 3. \quad (4.32)$$

Результат вимірювання записується у вигляді

$$Y = (y \pm \Delta_{\text{ep}}); P_{\text{доє}} = \dots, \text{ систематична похибка, розподіл нормальний.} \quad (4.33)$$

Приклад 4.10. При вимірюванні напруги $U = 79,524 \text{ В}$ похибка складається з п'яти систематичних складових, граничні значення яких знайдені попереднім оцінюванням та незалежні між собою $\Delta_{1\text{ep}} = \pm 0,0113 \text{ мВ}$; $\Delta_{2\text{ep}} = \pm 0,0238 \text{ мВ}$; $\Delta_{3\text{ep}} = \pm 0,0319 \text{ мВ}$; $\Delta_{4\text{ep}} = \pm 0,0224 \text{ мВ}$; $\Delta_{5\text{ep}} = \pm 0,0162 \text{ мВ}$.

Оцінити довірчі границі сумарної похибки при $P_{\text{доє}} = 0,90$ і навести результат вимірювання.

Розв'язання. Так як відомі тільки граничні значення окремих складових, то приймаємо, що розподіл їх значень в межах граничних значень рівномірний. Серед завданих складових відсутні такі, які переважають інші, тому то приймаємо розподіл нормальний, а коефіцієнт $z(0,90) = 1,65$. Оцінка стандартного відхилення сумарної систематичної похибки дорівнює

$$S_c = \sqrt{(0,0113^2 + 0,0238^2 + 0,0319^2 + 0,0224^2 + 0,0162^2) / 3} = 0,02872 \text{ мВ}.$$

Довірчі границі систематичної похибки визначаються

$$\Delta_{c.\text{доє}} = \pm 1,65 \cdot 0,02872 = \pm 0,04740 \text{ мВ}.$$

Граничне значення похибки заокруглюємо до першої значущої цифри 4, при цьому довірчу похибку заокруглюємо до двох значущих цифр $\Delta_{c.дов} = \pm 0,047 \text{ мВ}$.

Результат вимірювання заокруглюємо до тисячних часток мілівольта і записуємо $U = (79,524 \pm 0,047), \text{ мВ}, P_{дов} = 0,9, \text{ систематична похибка, розподіл нормальний}$.

Висновок. Кінцевою метою аналізу похибок вимірювань є оцінювання границь похибок, у яких вони містяться з певною ймовірністю, а результат вимірювання разом з інтервалом, який визначається цими границями похибки, із вказаною ймовірністю накриває істинне значення вимірюваної величини.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 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?
- 10 Що таке густина розподілу випадкової похибки? Що характеризує форма густини розподілу похибки?
- 11 Охарактеризуйте довірчі границі випадкової похибки.
- 12 Що таке математичне сподівання та дисперсія похибки?
- 13 Нормальний розподіл. Густина і числові характеристики нормального розподілу.
- 14 Основні операції опрацювання результатів вимірювань.

15 Числові характеристики алгебраїчної суми декількох складових випадкової похибки.

16 Знаходження довірчих границь алгебраїчної суми похибок.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 4

1 Відносна систематична похибка вимірювання опору $7,5 \text{ Ом}$ задана граничним значенням $\delta_{sp} = \pm 0,5\%$. Що означає такий запис?

2 Граничне значення абсолютної систематичної похибки мілівольтметра становить $\pm 1,2 \text{ мВ}$. Що означає такий запис?

3 Абсолютна похибка ватметра на межі вимірювання 750 Вт у режимі без калібрування може сягати значень $\pm 0,5 \text{ Вт/год}$. Знайти граничні значення цієї складової похибки за п'ять годин роботи ватметра.

4 Для нормального розподілу випадкової похибки з параметрами $m = 6 \text{ мА}$, $\sigma = 3,0 \text{ мА}$ визначити математичне сподівання похибки, її дисперсію та стандартне відхилення. Записати аналітичний вираз густини розподілу.

5 Для заданих трьох незалежних складових похибок знайти математичне сподівання сумарної похибки, дисперсію сумарної похибки, стандартне відхилення сумарної похибки, довірчі границі сумарної похибки та навести її запис. Похибки мають нормальні розподіли з такими параметрами: $m_1 = 4 \text{ мкВ}$, $\sigma_1 = 6 \text{ мкВ}$; $m_2 = -2 \text{ мкВ}$, $\sigma_1 = 4 \text{ мкВ}$; $m_3 = 1 \text{ мкВ}$, $\sigma_1 = 5 \text{ мкВ}$; $P_{\text{дов}} = 0,95$.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Значення фізичної величини, яке знайдене експериментальним шляхом і настільки наближене до істинного значення, що може використовуватись замість нього, має назву ...

1 істинне значення

2 похибка результату вимірювання

3 результат вимірювання

4 дійсне значення

2. Яка похибка є систематичною похибкою?

1 це складова похибки, що випадково змінюється у ряді вимірювань однієї й тієї ж величини

2 це різниця між результатом вимірювання та дійсним значенням вимірюваної величини

3 це складова похибки, що залишається сталою або прогнозовано змінюється у ряді вимірювань однієї й тієї ж величини

4 це абсолютна похибка, яка не залежить від значення вимірюваної величини

3. Які похибки зумовлені недосконалістю засобів вимірювальної техніки та залежністю їх властивостей від впливу зовнішніх умов?

1 методичні похибки

2 інструментальними

3 адитивні похибки

4 мультиплікативні похибки

4. Які похибки виникають від ефектів заокруглення та від обчислення при розв'язанні вимірювальної задачі?

1 випадкові похибки

2 надмірні похибки

3 регулярні похибки

4 обчислювальні похибки

5. Що таке абсолютна похибка вимірювань?

1 це різниця між результатом вимірювання та істинним значенням вимірюваної величини

2 це відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірювальної величини

3 це значення, яке ідеальним чином відображає властивість даного об'єкту, як в кількісному, так й якісному відношенні

4 це приблизна оцінка істинного значення величини, яка знайдена шляхом вимірювання

6. Що таке клас точності засобу вимірювальної техніки?

1 це похибки, які виникають під час динамічних вимірювань, в яких вимірювана величина під час вимірювального експерименту може змінюватися

2 це похибки, які виникають під час статичних вимірювань, в яких вимірювана величина упродовж вимірювального експерименту не змінюється

3 це узагальнена характеристика засобу вимірювань, що визначається межами його допустимих основної і додаткових похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на його точність

4 це занадто великі відхилення результату вимірювання від істинного значення, які є неможливими при використанні справних засобів вимірювань в робочих умовах

7. Яка суть умовного позначення класу точності **0,02/0,01**?

1 форма похибки – відносна; границі основної абсолютної похибки цифрових приладів

2 форма похибки – зведена; нормоване значення вимірюваної величини визначено в одиницях вимірюваної величини


3 форма похибки – зведена; нормоване значення вимірюваної величини приймається рівним довжині шкали або її частині

4 форма похибки – відносна; безпосередня вказівка на границю допустимої основної похибки

8. Яке умовне позначення класу точності безпосереднє вказує, що границя допустимої основної похибки дорівнює $\pm 2,5\%$?

1 1,5

2  2,5

3  2,5 ✓

4 3,0/2,5

9. Як аналітично визначаються абсолютна похибка аналогових приладів, якщо відомий клас точності та границі вимірювання?

$$1 \quad \Delta_{ep} = \frac{\gamma_{ep} \cdot X_K}{100\%} = \pm \frac{\text{кл.т.} \cdot X_K}{100\%}$$

$$2 \quad \delta_{ep} = \pm \left[c + d \cdot \left(\frac{X_K}{x_n} - 1 \right) \right] \cdot 100\%$$

$$3 \quad \Delta_{ep} = \pm \frac{d \cdot X_K + (c - d) \cdot x_n}{100\%}$$

$$4 \quad \delta_{ep} = \frac{\Delta_{ep}}{x_n} \cdot 100\% = \pm \text{кл.т.} \cdot \frac{X_K}{x_n}$$

10. Визначити, в якому випадку буде досягнута вища точність вимірювання струму 2,5 А, якщо для вимірювання використовувались два аналогові прилади: один класу точності 0,5 з границею вимірювання 5,0 А, другий класу точності 0,1 з границею вимірювання 10 А.

- 1 при застосуванні обох амперметрів
- 2 при застосуванні першого амперметра
- 3 при застосуванні другого амперметра
- 4 при застосуванні цифрового амперметра

11. Визначити величину відносної похибки вимірювань температури, якщо результат вимірювання дорівнює 37,1 °С, істинне значення дорівнює 37,4 °С

- 1 0,3 °С
- 2 мінус 0,8 %
- 3 мінус 0,3 °С
- 4 0,8 %

РОЗДІЛ 5.

МЕТРОЛОГІЧНА ПОВІРКА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

5.1 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 номенклату-

ра 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.

5.2 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 використовується зразковий ЗВТ:

- метод безпосереднього порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ;
- метод порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ за допомогою компаратора;
- метод прямого вимірювання ЗВТ, що повіряється, величини, що відтворюється зразковою мірою (однозначною або багатозначною);
- метод прямого вимірювання зразковим ЗВТ величини, що відтворюється мірою, що повіряється;
- метод непрямого вимірювання величини, що відтворюється ЗВТ, що повіряється.

Всі методи повірки мають свої особливості, тому то розглянемо їх більш детально:

- метод безпосереднього порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ є самим найпоширенішим з методів повірки, так як його застосовують в галузі електричних та магнітних вимірювань для повірки приладів прямого перетворення: амперметрів, вольтметрів, ватметрів, частотомірів, омметрів, та в галузі вимірювань механічних величин – для повірки манометрів та витратомірів.

Основою методу є одночасне вимірювання одного й того самого значення фізичної величини зразковим приладом та приладом, що повіряється. За результатами вимірювань порівнюють показання приладу, що повіряється, X_{Π} , з показаннями зразкового приладу, $X_{ЗР}$, та визначають похибку, Δ , приладу, що повіряється

$$\Delta = X_{\Pi} - X_{ЗР}. \quad (5.1)$$

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 проградуїований 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 5.1. Застосування методу непрямих вимірювань розглянемо на прикладі повірки лічильника електричної енергії, відносну похибку, $\delta_{лич}$, якого розраховують за формулою

$$\delta_{лич} = \frac{W_{\Pi} - W_{ЗР}}{W_{ЗР}} \cdot 100\%,$$

де W_{Π} – значення електричної енергії за показами лічильника, що повіряється;

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

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

Висновок: при проведенні повірки лічильника методом непрямого вимірювання 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 окремими елементами схем ЗВТ, що повіряється, з величиною, яка вибрана як базова і відтворюється в самому ЗВТ, що повіряється.

Перевагами автономної повірки є висока точність та оперативність роботи, а недоліками є висока трудомісткість робіт з повірки.

Розглянемо вимоги до зразкових ЗВТ. Вибір зразкових ЗВТ є важливим завданням при організації повірки 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

$$\delta_{ЗР,зр} \leq \frac{1}{\alpha} \cdot \delta_{ПОВ,зр}, \quad (5.2)$$

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 (5.2) 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

$$\gamma_{ЗР.зр} \leq \alpha \cdot \gamma_{П.зр} \cdot \frac{X_{К.П}}{X_{К.ЗР}}, \quad (5.3)$$

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.

5.3 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 мет-

рологічної 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 повірки приладів прямого перетворення основними задачами є визначення необхідного класу точності зразкового приладу і вибір його системи та границь вимірювання.

Співвідношення між основними похибками зразкових приладів та приладів, що повіряється, повинно бути не більш, ніж 1:3 при повірці приладів класів точності 0,05...0,5 і не більш, ніж 1:4 – для приладів класів точності 1,0...5,0. Варіація показань зразкового приладу не повинна перевищувати половини абсолютного значення границі його допустимої основної похибки. Допускається співвідношення приймати такими, що дорівнюють 1:2,5, але до показань зразкових приладів необхідно вводити поправки.

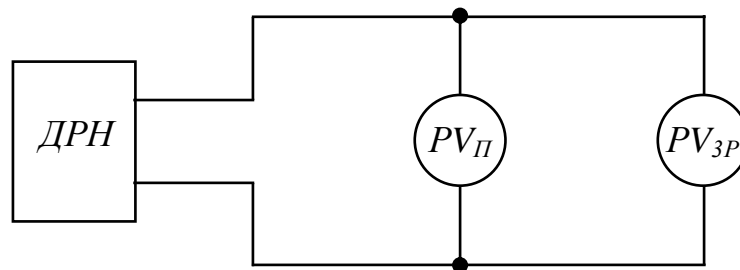
При виборі системи зразкового приладу керуються такими вимогами:

- повірка здійснюється на тому роді струму, для якого вони призначені;
- зразковий прилад повинен бути призначений для вимірювання тієї ж самої фізичної величини, що й прилад, що повіряється;
- діапазони вимірювань і частот зразкових приладів повинні включати відповідні діапазони приладу, що повіряється;
- при повірці приладу на змінному струмі слід обирати такий зразковий прилад, який реагує на зміну кривої сигналу так само, як і прилад, що повіряється.

При виборі границі вимірювання зразкового приладу необхідно виходити із співвідношення

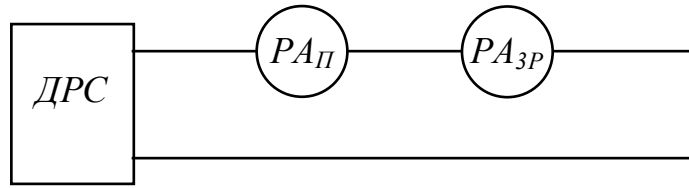
$$X_{к.зр} \geq X_{к.п} \cdot \quad (5.4)$$

На рисунку 5.1 наведені схеми повірки вольтметрів (а) та амперметрів (б) методом безпосереднього порівняння із зразковими приладами.



ДРН – джерело регулювання напруги

Рисунок 5.1.а – Схеми повірки вольтметра методом безпосереднього порівняння із зразковим вольтметром



ДРС – джерело регулювання струму

Рисунок 5.1.б – 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 5.1.а

$$\Delta = U_{II} - U_{ЗР}; \quad (5.5)$$

- для схеми рисунку 5.1.б

$$\Delta = I_{II} - I_{ЗР}. \quad (5.6)$$

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

- для схеми рисунку 5.1.а

$$\delta_{ЗР.зр} = \pm \delta_{PV_{ЗР}}, \quad (5.7)$$

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

- для схеми рисунку 5.1.б

$$\delta_{ЗР.зр} = \pm \delta_{РА_{ЗР}}, \quad (5.8)$$

де $\delta_{РА_{ЗР}}$ - похибка показу зразкового амперметра, %.

Для розширення границь вимірювань зразкових приладів використовують подільники напруги при повірці вольтметрів на постійному та змінному струмі (див. рисунок 5.2) і вимірювальні трансформатори напруги тільки на змінному

струмі. При повірці амперметрів використовують на постійному струмі шунти, а на змінному струмі – вимірювальні трансформатори струму – рисунок 5.3.

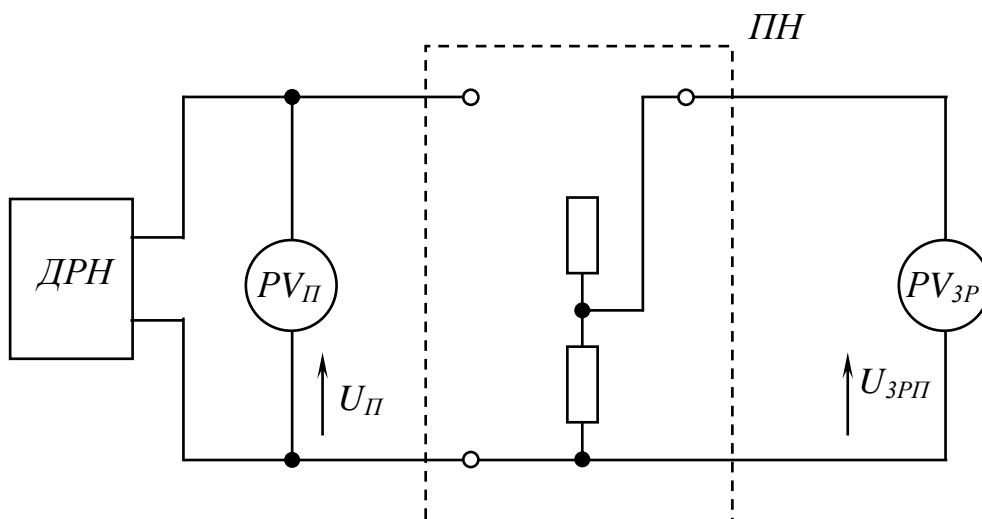


Рисунок 5.2 – Схема повірки вольтметра на постійному та змінному струмі при використанні подільника напруги

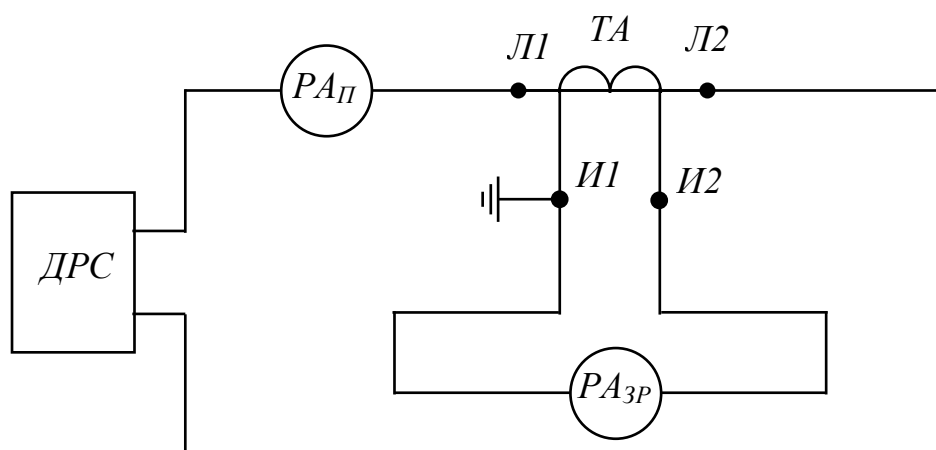


Рисунок 5.3 – Схема повірки амперметра на змінному струмі при використанні вимірювального трансформатора струму

Значення абсолютної похибки, Δ , для таких схем визначається за формулами:

- для схеми рисунку 5.2

$$\Delta = U_{\text{П}} - k_{\text{ПН}} \cdot U_{\text{ЗРП}}; \quad (5.9)$$

- для схеми рисунку 5.3

$$\Delta = I_{ПОВ} - k_{IH} \cdot I_{ЗР}; \quad (5.10)$$

Відносна похибка вимірювання, $\delta_{ЗР.зр}$, зразковим приладом дорівнює сумі похибок зразкового приладу та відповідного вимірювального перетворювача - для схеми рисунку 5.2

$$\delta_{ЗР.зр} = \pm(\delta_{PV_{ЗР}} + \delta_{ПН.зр}), \quad (5.11)$$

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

- для схеми рисунку 5.3

$$\delta_{ЗР.зр} = \pm(\delta_{РА_{ЗР}} + f_{I.зр}); \quad (5.12)$$

де $\delta_{РА_{ЗР}}$ - похибка показу зразкового амперметра, %.

На рисунку 5.4 наведена схема повірки ватметрів методом безпосереднього порівняння із зразковим ватметром при роздільному живленні кіл струму та напруги.

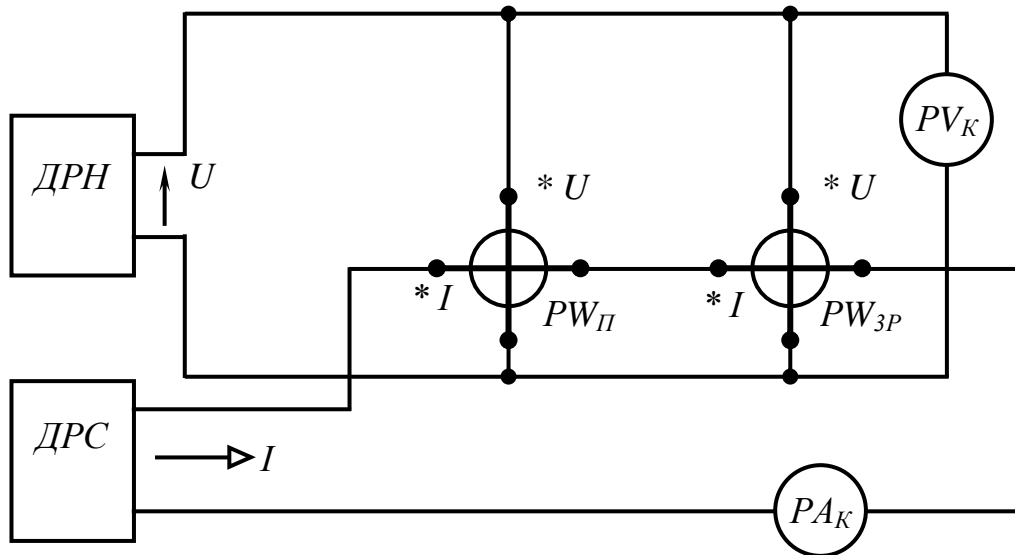


Рисунок 5.4 – Схема повірки ватметрів методом безпосереднього порівняння із зразковим ватметром при роздільному живленні кіл струму та напруги

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

$$\delta_{PA_{3P}} = \pm \gamma_{PA.2P} \cdot \frac{X_{K.PA_{3P}}}{X_{PA_{3P}}}, \quad (5.13)$$

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;

$$\delta_{PV_{3P}} = \pm \gamma_{PV.2P} \cdot \frac{X_{K.PV_{3P}}}{X_{PV_{3P}}}, \quad (5.14)$$

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;

$$\delta_{PW_{3P}} = \pm \gamma_{PW.2P} \cdot \frac{X_{K.PW_{3P}}}{X_{PW_{3P}}}, \quad (5.15)$$

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 5.2 Необхідно провести повірку (обрати метод та повірки схему) електромагнітного вольтметра типу ЭВ0302/1 класу точності 1,5 з діапазоном вимірювання 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 5.1 а.

2. Так як вольтметр, що повіряється, призначений для вимірювань середньоквадратичних значень змінної напруги, то у якості зразкового можна використовуву-

вати 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 5.3 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 – рисунок 5.3.

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

$$I_2 = \frac{I_1}{k_{IH}} = \frac{I_{HPA}}{k_{IH}} = \frac{30}{50/5} = 3 \text{ А}.$$

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.

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

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

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

$$\delta_{зр.зр} = \pm(\delta_{PA_{зр.зр}} + f_{TA.зр}),$$

де $f_{TA.зр}$ - 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 ДО РОЗДІЛУ 5

1 Що таке повірка засобів вимірювальної техніки? Яка мета повірки?

2 Які види повірок Вам відомі?

3 Які Ви знаєте методи повірки засобу вимірювань?

4 Охарактеризуйте метод безпосереднього порівняння засобу вимірювань зі зразковим приладом.

5 Що таке автономна повірка ЗВТ?

6 Охарактеризуйте основні операції повірки.

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

8 За якими умовами слід обирати систему зразкового приладу?

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

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

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 5

1 Під час метрологічної повірки амперметра магнітоелектричної системи класу точності 0,5 з границею вимірювання 5 А на позначках шкали: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 А методом порівняння амперметра зі зразковим амперметром були отримані такі покази зразкового амперметра: 1,05; 1,98; 3,025; 3,99; 5,0 А. Чи відповідає амперметр, що повіряється, своєму класу точності?

2 Який клас точності має амперметр з границею вимірювання 1,5 А, якщо границя його допустимої основної абсолютної похибки становить $\pm 7,5 \cdot 10^{-3} A$?

3 Під час метрологічної повірки вольтметра електромагнітної системи класу точності 1,5 з границею вимірювання 300 В на позначках шкали: 50; 100; 150; 200; 250 В методом порівняння вольтметра зі зразковим вольтметром були отримані такі покази зразкового вольтметра: 56; 96; 147; 202; 249 В. Чи відповідає вольтметр, що повіряється, своєму класу точності?

4 Обрати метод і схему повірки та зразкові засоби вимірювальної техніки для проведення метрологічної повірки приладу, метрологічні характеристики якого наведені в таблиці.

№ варіанту	Прилад	Тип приладу	Клас точності	Границя вимірювання	Частота струму, Гц	Рід струму
1	PV	Э140/1	1,5	450 В	50...400	змінний
2	РА	Э316	1,0	20 А	45...60	змінний
3	РА	М4262	1,5	5 А	-	постійний
4	РА	Э140	2,5	10 А	50...400	змінний
5	PV	М4262	1,5	250 В	-	постійний
6	PV	М2004	0,2	150 В	-	постійний

5 Під час метрологічної повірки ватметра феродинамічної системи класу точності 1,5 з границею вимірювання за струмом 5 А та з границею вимірювання за

напругою 300 В на позначках шкали: 200; 400; 600; 800; 1000; 1200 Вm методом порівняння зі зразковим ватметром були отримані такі покази зразкового приладу: 240; 430; 580; 815; 990; 1205 Вm.

Оберіть метод повірки ватметра та наведіть схему повірки приладу. Обґрунтовано виберіть зразковий ватметр. Обчисліть величини абсолютних, відносних та приведених похибок у кожній фіксованій точці шкали ватметра, що повіряється. Чи відповідає ватметр, що повіряється, своєму класу точності?

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Визначення похибок засобів вимірювальної техніки та встановлення їх придатності для застосування за призначенням має назву

- 1 калібрування
- 2 повірка засобів вимірювальної техніки
- 3 метрологічна атестація
- 4 метрологічний контроль

2. Первинна повірка – це

1 повірка, яка здійснюється при випуску засобів вимірювальної техніки з виробництва або після ремонту та при ввезенні їх із-за кордону партіями

2 повірка засобів вимірювальної техніки, що знаходяться в експлуатації або на зберіганні, через певні між перевіроючі інтервали, які встановлюються, виходячи із забезпечення метрологічної справності засобів на період між повірками

3 повірка, яка виконується, якщо виникли спірні питання стосовно метрологічних характеристик, придатності та правильності використання ЗВТ

4 повірка, яка проводиться під час державного метрологічного нагляду з метою перевірки придатності засобу вимірювальної техніки до застосування

3. Визначити похибку зразкового амперметра, %, класу точності 0,2 з границею вимірювання 5 А при вимірюванні сили струму 4 А.

- 1 2,5 %
- 2 0,25 %
- 3 0,01 А
- 4 0,01 %

4. Яка повірка здійснюється при виникненні спірних питань щодо метрологічних характеристик, справності та придатності засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) до застосування?

- 1 вибіркова повірка ЗВТ
- 2 позачергова повірка ЗВТ
- 3 експертна повірка ЗВТ
- 4 первинна повірка ЗВТ

5. Яка повірка здійснюється протягом експлуатації ЗВТ через встановлений проміжок часу?

- 1 первинна повірка ЗВТ
- 2 вибіркова повірка ЗВТ
- 3 позачергова повірка ЗВТ
- 4 періодична повірка ЗВТ

6. Що є основою методу безпосереднього порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ?

1 зміна розміру міри до суміщення покажчика аналогового приладу, що повіряється, з позначкою шкали

2 проміжний елемент – компаратор для опосередкованого порівняння двох фізичних величин

3 оцінювання результату сумісної дії двох ЗВТ: зразкового та того, що повіряється

4 одночасне вимірювання значення фізичної величини зразковим приладом та приладом, що повіряється

7. Яким повинно бути співвідношення між похибками зразкового ЗВТ та ЗВТ, що повіряється?

- 1 1:3
- 2 дорівнювати один одному
- 3 1:1
- 4 1:7

8. Яким повинен бути діапазон вимірювань зразкового ЗВТ та діапазон вимірювань ЗВТ, що повіряється?

- 1 меншим
- 2 більшим
- 3 інваріантним
- 4 великим

9. Визначити похибку зразкового вольтметра, %, класу точності 1,0 з границею вимірювання 150 В при вимірюванні напруги 135 В.

- 1 2,0 %
- 2 2,5 %
- 3 1,11 %
- 4 0,1 %

ЧАСТИНА 2. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

РОЗДІЛ 6.

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

6.1 Загальні положення

Вимірювальний перетворювач – це вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення фізичної величини.

Основними метрологічними характеристиками вимірювальних перетворювачів (ВП) є *функція перетворення* – рисунок 6.1, *коефіцієнт перетворення* і *клас точності*, які наведені в таблиці 6.1.

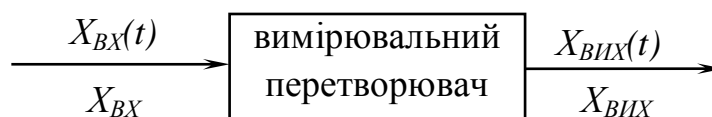


Рисунок 6.1 – Вхідний $X_{BX}(t)$ та вихідний сигнали $X_{BIX}(t)$ ВП та їх вимірювальні параметри X_{BX} і X_{BIX}

Таблиця 6.1 - Основні метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів

Метрологічні характеристики ВП	Означення
Функція перетворення $X_{BIX} = f(X_{BX})$	це залежність інформативного параметра X_{BIX} вихідного сигналу $X_{BIX}(t)$ від інформативного параметра X_{BX} вхідного сигналу $X_{BX}(t)$.
Коефіцієнт перетворення k	це відношення інформативного параметра X_{BIX} вихідного сигналу до інформативного параметра X_{BX} вхідного сигналу $k = \frac{X_{BIX}}{X_{BX}}$.
Клас точності ВП	це узагальнена характеристика ЗВТ, яка визначає границі допустимих основної та додаткових похибок, які виражають у формі відносних і приведених похибок.

В залежності від призначення вимірювальні перетворювачі електричних величин поділяються на групи - рисунок 6.2.

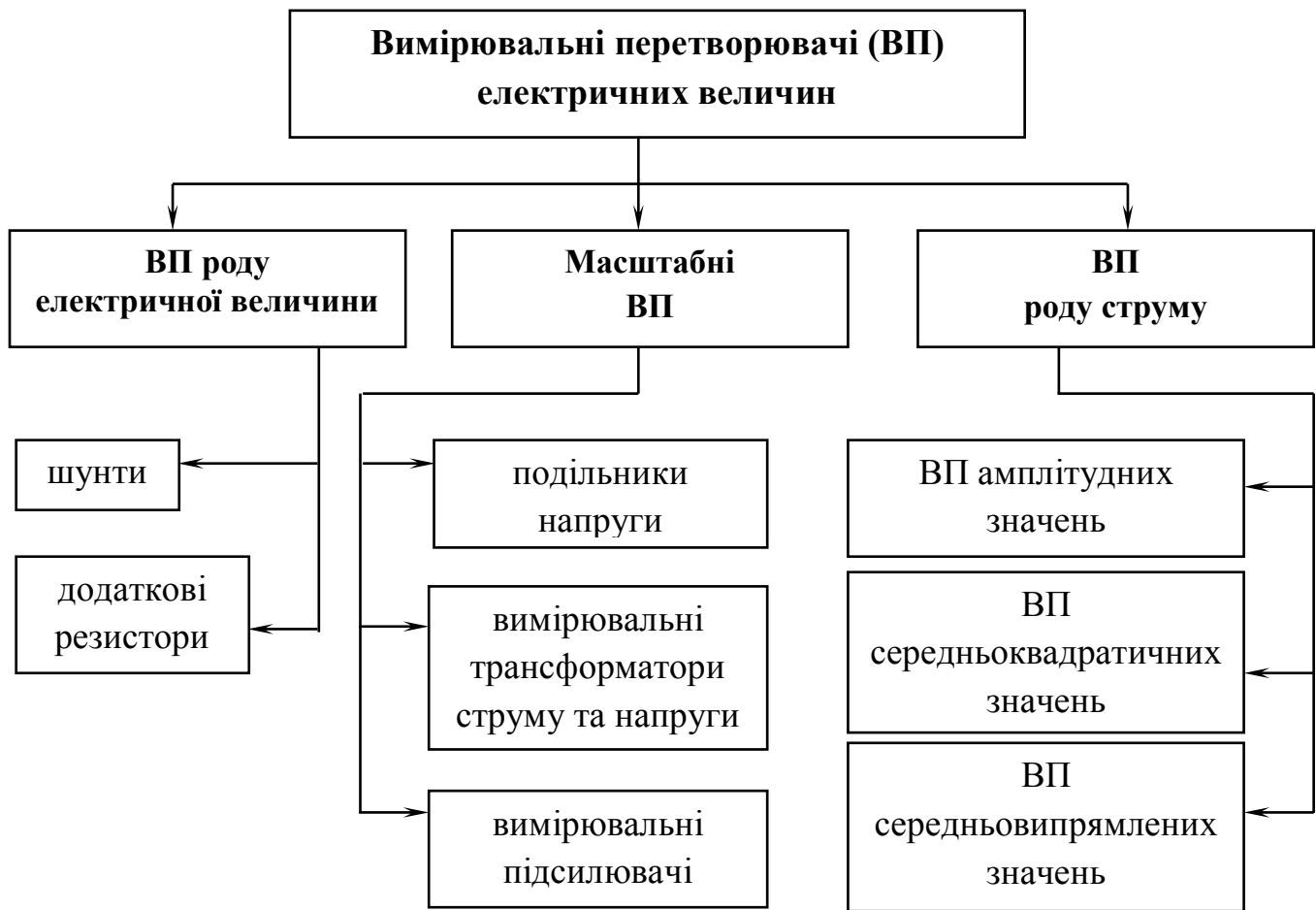


Рисунок 6.2 – Класифікація вимірювальних перетворювачів електричних величин

Згідно рисунку 6.2 вимірювальні перетворювачі поділяються на три групи:

- вимірювальні перетворювачі роду електричної величини – *шунти* та *додаткові резистори*;
- масштабні вимірювальні перетворювачі, в яких реалізоване масштабне вимірювальне перетворення електричної величини, тобто здійснюється зміна розміру електричної величини в задану кількість разів. До цієї групи належать *подільники напруги, вимірювальні трансформатори струму і напруги та вимірювальні підсилювачі*;

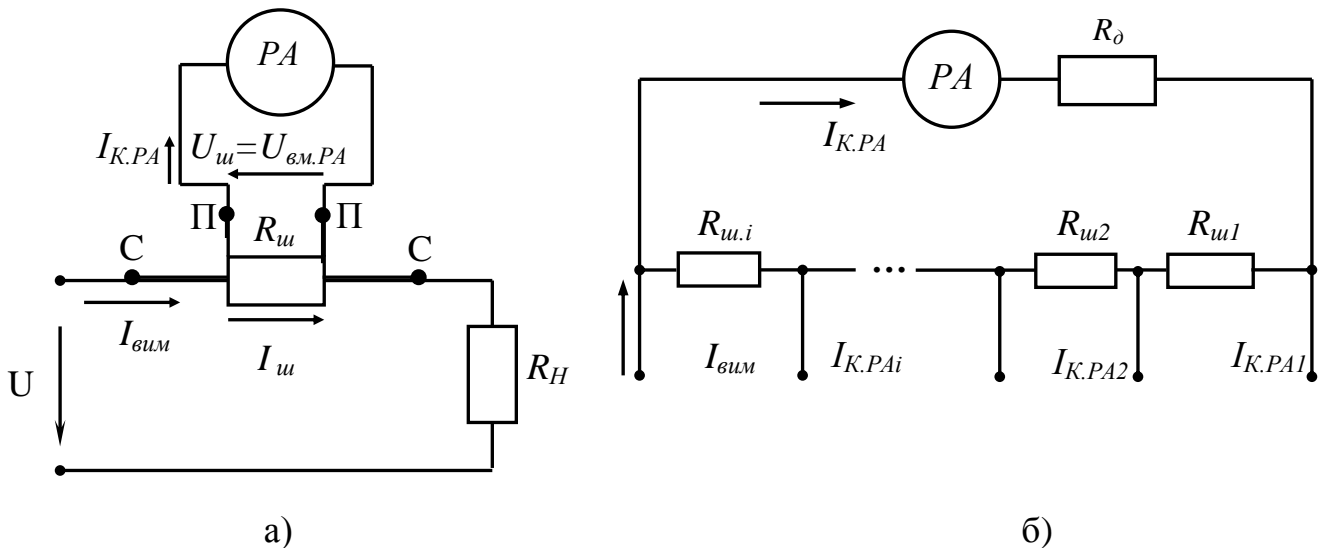
- вимірювальні перетворювачі роду струму – *вимірювальні перетворювачі середньовипрямлених, середньоквадратичних та амплітудних значень.*

6.2 Резистивні перетворювачі

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 6.3.



а - односторонній; б – багаторічний

Рисунок 6.3 – Схеми включення шунта

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 *взаємо-*

замінні 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 *багатограничними*.

Аналітично опір однограничного шунта розраховується за формулою

$$R_{ш} = \frac{R_{PA}}{\frac{I_{вим}}{I_{K.PA}} - 1} = \frac{R_{PA}}{p - 1}, \quad (6.1)$$

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

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

$I_{K.PA}$ - верхня границя вимірювання амперметра, А;

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

Опір багатограничного шунта розраховується за формулою

$$R_{ш1} = R_{PA} \cdot \frac{p_1}{p_1 - 1} \cdot \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right); \quad (6.2)$$

$$R_{ш2} = R_{PA} \cdot \frac{p_1}{(p_1 - 1) \cdot p_2}, \quad (6.3)$$

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

$$p_1 = \frac{I_{K.PA1}}{I_{K.PA}}; \quad (6.4)$$

$$p_2 = \frac{I_{K.PA2}}{I_{K.PA}}. \quad (6.5)$$

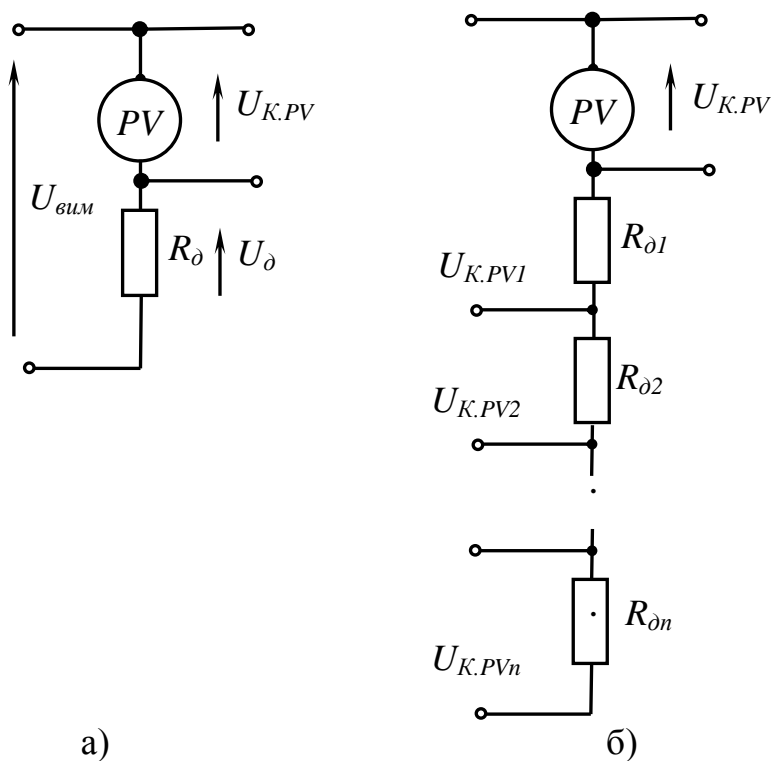
Основними метрологічними характеристиками шунтів є: номінальне значення опору $R_{шн}$, номінальне значення спаду напруги $U_{шн}$, номінальне значення струму $I_{шн}$ та клас точності. Номінальні значення спаду напруги на шунті $U_{шн}$ можуть дорівнювати 15; 30; 45; 75; 150; 300 мВ, а номінальний струм

$I_{шн} = a \cdot 10^n$, 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 $\delta_{ш.зр}$

$$\delta_{ш.зр} = \pm \frac{\Delta R_{ш.зр}}{R_{ш.н}} \cdot 100\% = \pm c, \% \quad (6.6)$$

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 6.4, 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 6.4 – 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 6.4.

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

Аналітично опір однограничного додаткового резистора розраховується за формулою

$$R_{\partial} = R_{PV} \cdot \left(\frac{U_{вим}}{U_{K.PV}} - 1 \right) = R_{PV} \cdot (n - 1), \quad (6.7)$$

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

$$R_{\partial 1} = \frac{U_{вим1} - I_{PV} \cdot R_{PV}}{I_{PV}}; \quad (6.8)$$

$$R_{\partial 2} = \frac{U_{вим2} - U_{вим1}}{I_{PV}}. \quad (6.9)$$

Основними метрологічними характеристиками додаткових резисторів є: номінальне значення опору $R_{\text{дн}}$, номінальна напруга $U_{\text{дн}}$, номінальне значення струму $I_{\text{дн}}$ 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 $\delta_{\text{д.зр}}$

$$\delta_{\text{д.зр}} = \pm \frac{\Delta R_{\text{д.зр}}}{R_{\text{д.н}}} \cdot 100\% = \pm c, \%, \quad (6.10)$$

де $\Delta R_{\text{д.зр}}$ – границя допустимої абсолютної похибки додаткового резистора, Ом.

6.3 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 $k_{\text{ПН}}$, номінальні значення вхідного $R_{\text{ВХ.Н}}$ і вихідного $R_{\text{ВИХ.Н}}$ опорів, максимальне значення вхідної напруги $U_{\text{ВХ.маx}}$ та клас точності.

Номінальний коефіцієнт поділу $k_{\text{ПН}}$ на постійному струмі визначається за формулою

$$k_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{ВХ.Н}}}{U_{\text{ВИХ.Н}}} = \frac{R_{\text{ВХ.Н}}}{R_{\text{ВИХ.Н}}}. \quad (6.11)$$

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

$$\delta_{\text{ПН.зр}} = \pm \frac{\Delta k_{\text{П.зр}}}{k_{\text{ПН}}} \cdot 100\% = \pm c, \%, \quad (6.12)$$

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

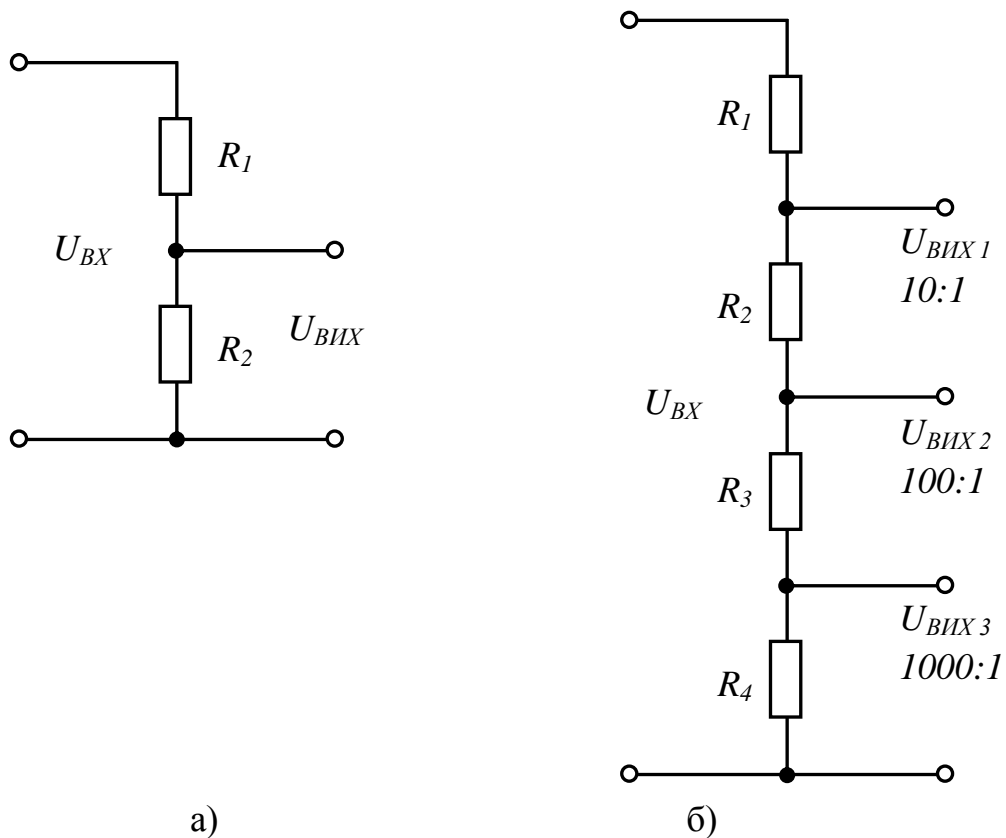
Максимальне значення вхідної напруги подільника напруги $U_{\text{ВХ.max}}$ – це найбільше значення напруги, яке можна подавати на вхід подільника напруги при певному значенні коефіцієнту поділу.

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

Схема однограничного резистивного подільника напруги наведена на рисунку 6.5.а., коефіцієнт поділу якого дорівнює

$$k_{\text{П}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВИХ}}} = 1 + \frac{R_1}{R_2}. \quad (6.13)$$

На рисунку 6.5.б наведена схема багатограничного резистивного подільника напруги.



а – однограничний; б - багатограничний

Рисунок 6.5 - Схеми включення подільників 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

$$\delta_{\text{ПН.сп}} = \frac{1}{k_{\text{ПН}}} \cdot (\delta_{R1} - \delta_{R2}), \quad (6.14)$$

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

Ємнісні подільники напруги – це подільники, які здебільшого застосовуються для розширення границь вимірювань електростатичних вольтметрів. Схема ємнісного подільника напруги наведена на рисунку 6.6.

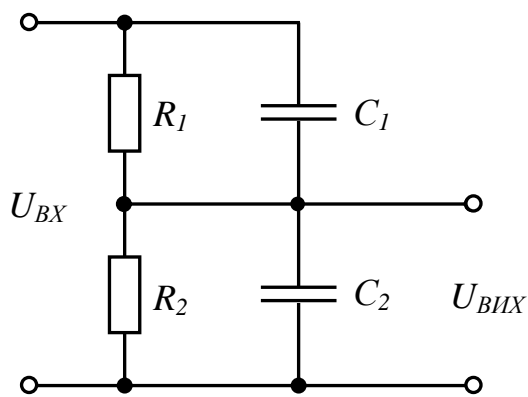


Рисунок 6.6 – Схема ємнісного подільника напруги

Коефіцієнт поділу такого подільника дорівнює

$$k_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{BX.H}}}{U_{\text{VIX.H}}} = \frac{Z_{C1} + Z_{C2}}{Z_{C2}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}. \quad (6.15)$$

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 6.7 та 6.8 відповідно.

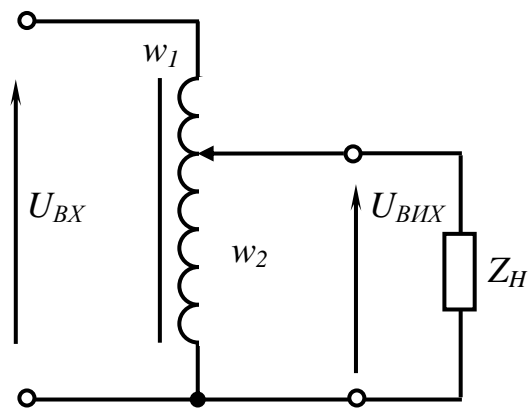


Рисунок 6.7 –

Автотрансформаторна схема
індуктивного подільника напруги

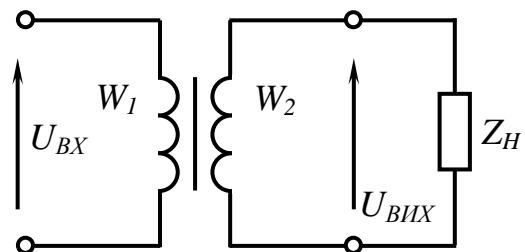


Рисунок 6.8 –

Трансформаторна схема
індуктивного подільника напруги

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

$$k_{\text{передачі}} = \frac{U_{ВИХ}}{U_{ВХ}} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (6.16)$$

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.

6.4 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 6.9.

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.

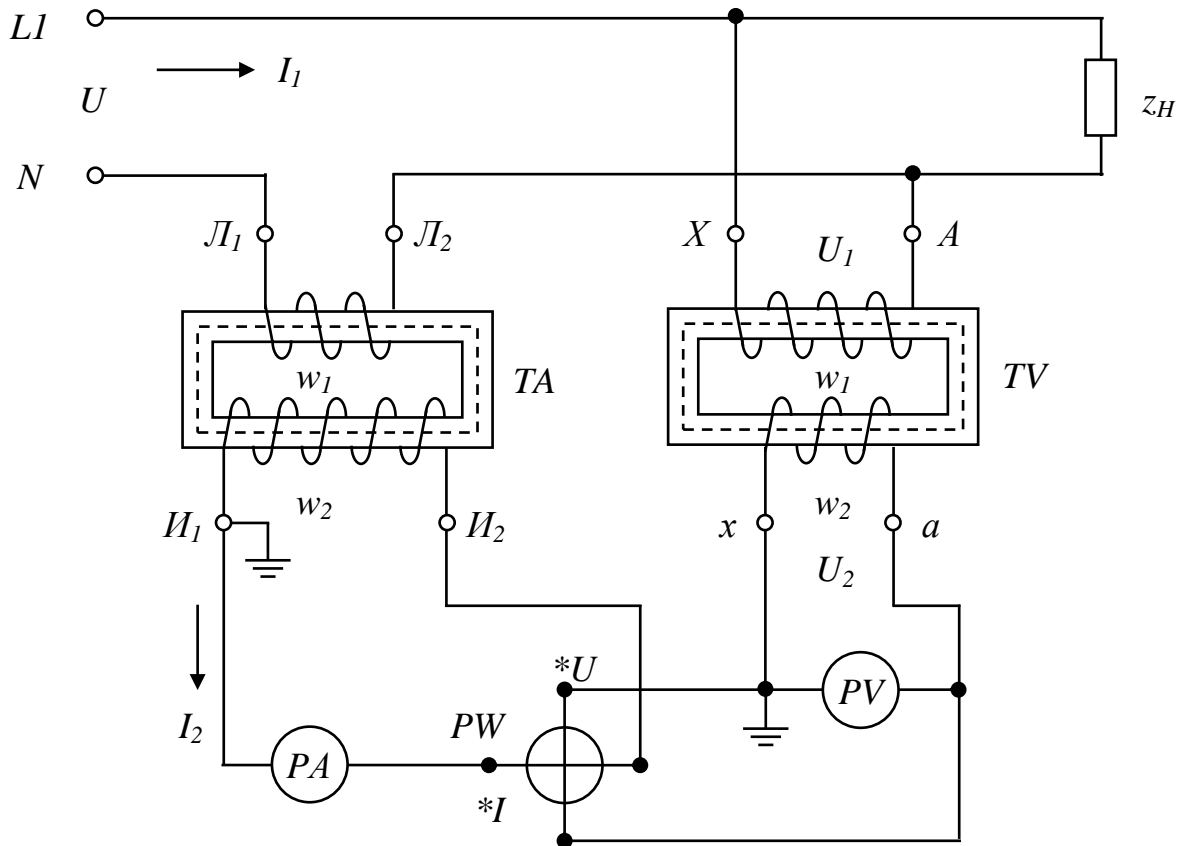
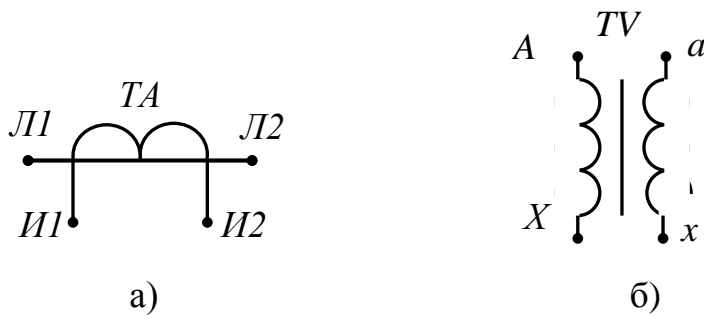


Рисунок 6.9 – Вимірювальні трансформатори струму (ТА) та напруги (ТВ) та схеми їх включення до однофазного кола змінного струму

Для правильного вмикання вимірювальних трансформаторів їх затискачі мають спеціальні позначення – рисунок 6.10. На рисунку 6.10.а наведено умовне графічне позначення вимірювального трансформатора струму, а на рисунку 6.10.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 6.10 - 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}

$$k_{IH} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (6.17)$$

Номінальне 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.

Номінальне 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 s , 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_{1H} . При $I_{1H} \geq 100A$ 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

$$I_{\text{кола}} = k_{IH} \cdot I_{2PA}, \quad (6.18)$$

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

Приклад 6.1. Визначити номінальний коефіцієнт трансформації ВТС, очікуване показання амперметра у вторинному колі при вимірюванні струму, якщо орієнтовне значення якого дорівнює 45 A .

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

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

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}

$$k_{UH} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (6.19)$$

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 включаються 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 6.11.

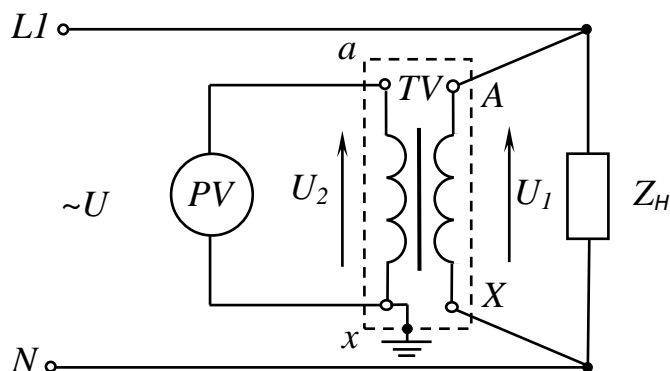


Рисунок 6.11 - Схема включення вольтметра через ВТН до однофазного кола змінного струму

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

$$U_{\text{кола}} = k_{UH} \cdot U_{2PV}, \quad (6.20)$$

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

Приклад 6.2. 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 $U_{1H} = 500$ В, а вторинна номінальна напруга дорівнює $U_{2H} = 100$ В, тобто $k_{UH} = 500/100$. Очікуване показання вольтметра у вторинному колі буде дорівнювати

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

6.5 Вимірювальні підсилювачі

Вимірювальні підсилювачі (ВП) – це засоби вимірювальної техніки, які призначені для підсилення електричних сигналів та для підвищення чутливості засобів вимірювань з одночасним послабленням впливу неінформативних параметрів. Вони зменшують споживання енергії від досліджуваного об'єкта та застосовуються для узгодження опорів перетворювачів у разі їх спряження, зокрема, якщо потрібно під'єднати низькоомний опір навантаження до високоомного джерела сигналу.

Вимірювальні підсилювачі є не тільки масштабними перетворювачами напруги, але й перетворювачами напруги на струм або струму на напругу.

Узагальнену структурну схему вимірювального підсилювача можна подати у вигляді підсилювального елемента (підсилювача), охопленого колом від'ємного зворотного зв'язку.

Завдяки досягненням сучасної мікроелектронної техніки підсилювальні елементи виконують здебільшого у вигляді інтегральних мікросхем. Такі підсилювачі прийнято називати операційними підсилювачами (ОП), які розглядаються як елемент з двома входами: інвертуючим та неінвертуючим, до яких подаються, відповідно, напруги U_{ex1} та U_{ex2} .

Основною функцією операційного підсилювача є підсилення різниці вхідних синфазних напруг U_{ex1} та U_{ex2} коефіцієнтом k_U , причому його еквівалентна вихідна напруга дорівнює

$$e_{vix} = -k_U \cdot (U_{ex1} - U_{ex2}). \quad (6.21)$$

Через наявність вихідного опору Z_{vix} підсилювача його вихідна напруга U_{vix} дещо відрізняється від e_{vix} . Крім коефіцієнта підсилення та вхідних опорів, важливими технічними характеристиками операційного підсилювача є частота одиничного підсилення, максимальна швидкість наростання вихідної напруги,

коефіцієнт послаблення синфазного сигналу напруги, еквівалентна вхідна напруга шумів, вхідна напруга зміщення та вхідні струми.

Частота одиничного підсилення – це частота вхідного сигналу, який перетворює операційний підсилювач з коефіцієнтом $k_U = 1$.

Максимальна швидкість наростання вихідної напруги – це найбільша швидкість зміни вихідної напруги під час подачі на його входи імпульсу прямокутної форми максимально допустимої амплітуди.

Коефіцієнт послаблення синфазного сигналу – це відношення коефіцієнту підсилення k_U до коефіцієнта передавання на вихід операційного підсилювача синфазного сигналу.

Вхідна напруга зміщення – це диференціальна постійна напруга, після прикладення до входів операційного підсилювача на його виході встановлюється напруга, що дорівнює нулю.

Сучасні вимірювальні операційні підсилювачі поділяють на дві групи: *універсальні* та *спеціальні*.

До універсальних вимірювальних операційних підсилювачів належать підсилювачі середньої точності, з середньою швидкодією та смугою пропускання сигналів. Такі підсилювачі оптимізовані за статичними і динамічними параметрами, а саме – вхідними струмами в десятки – сотні наноампер, коефіцієнтом послаблення синфазної складової вхідної напруги не менше, ніж 80...90 дБ, частотою одиничного підсилення до 5 МГц, швидкістю наростання вихідної напруги до 5...10, вхідною напругою зміщення у межах кількох мілівольт і її температурною зміною до десятків мікрвольт на градус, вхідною напругою шумів у одиниці мікрвольт у смузі 10 Гц...10 кГц. Завдяки названим параметрам ОП середньої точності надзвичайно широко застосовують для виконання як вимірювальних, так і контрольних функціональних завдань. До цієї численної групи належать також мікропотужні та програмовані ОП. Перші характеризуються малими напругами живлення та мікроспоживанням, що робить їх незамінними у портативній і мініатюрній апаратурі. У програмованих підсилювачах за допомогою спеціального відводу можна регулювати режим роботи вхідних каскадів

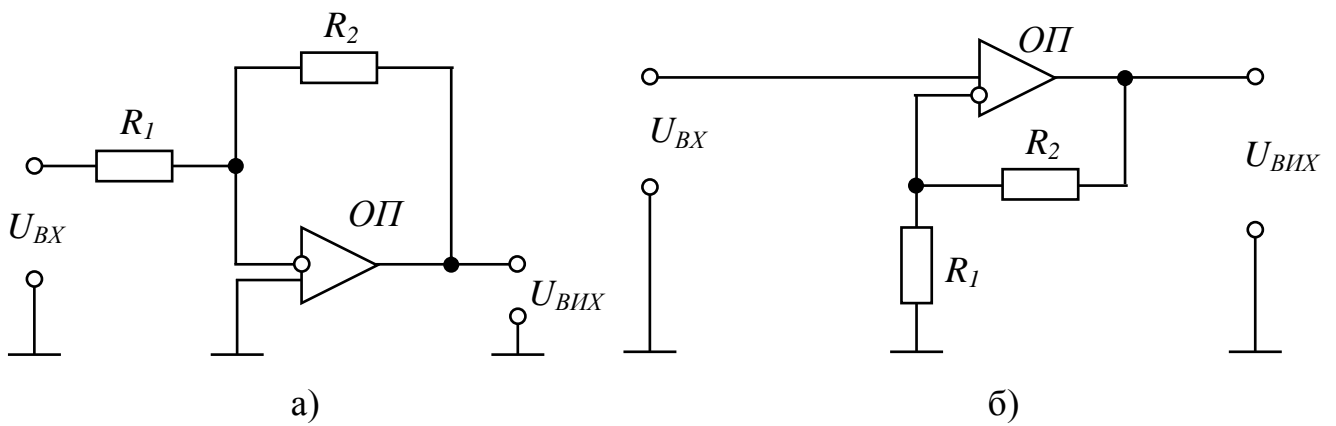
і тим самим змінювати ширину частотної смуги та потужність споживання самих ОП.

До другої групи – спеціальних операційних підсилювачів – належать швидкодіючі та прецизійні підсилювачі. Швидкодіючі – це підсилювачі з великою шириною частотної смуги (частота одиничного підсилення до 500 МГц) та найкращими динамічними параметрами (швидкість наростання вихідної напруги – сотні вольт за мікросекунду і час встановлення її – одиниці мікросекунд з точністю до десятих часток відсотка). Прецизійні операційні підсилювачі – це спеціальні підсилювачі, для мінімізації певного масиву параметрів яких вжито схемних, структурно – алгоритмічних та конструкторських заходів. Результатом цього є забезпечення в них вхідних струмів в десятки – сотні пікоампер; коефіцієнта послаблення синфазної складової вхідної напруги до 120 дБ ; вхідної напруги зміщення у одиниці – сотні мікрвольт у разі її температурної зміни в одиниці мікрвольт на градус; вхідної напруги шумів, меншої за 1 мкВ .

Однак такі операційні підсилювачі мають обмежену частотну смугу сигналів – частоту одиничного підсилення не вище, ніж $0,5 \text{ МГц}$ та низьку швидкість наростання вихідної напруги – частка вольт за мікросекунду.

Для того щоб поліпшити метрологічні характеристики операційних підсилювачів їх охоплюють колами від’ємного зворотного зв’язку, що дає змогу наблизити до ідеальних значення їх вхідного чи вихідного опорів, підвищити стабільність коефіцієнту підсилення у вибраній частотній смузі вхідних сигналів.

На рисунку 6.12 наведені схеми інвертуючого (а) та неінвертуючого (б) підсилювачів напруги на операційних підсилювачах.



а – інвертуючий; б - неінвертуючий

Рисунок 6.12 – Схеми підсилювачів напруги

Якщо вважати операційний підсилювач ідеальним, то в схемі інвертуючого підсилювача вхідна напруга $U_{вх}$ прикладається до резистора R_1 , що викликає

$$\text{появу струму } i_{вх} = \frac{U_{вх}}{R_1} .$$

Струм $i_{вх}$ протікає через резистор R_2 і вихід операційного підсилювача та створює вихідну напругу $U_{вих}$

$$U_{вих} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{вх} . \quad (6.22)$$

Коли вхідна постійна напруга $U_{вх}$ подається до інвертуючого підсилювача, вихідна напруга $U_{вих}$ матиме протилежну полярність, а у разі подання вхідної змінної напруги буде до неї у протифазі. Коефіцієнт підсилення дорівнює

$$K_{ін} = -\frac{R_2}{R_1} . \quad (6.23)$$

Якщо $U_{вх}$ подається до неінвертуючого підсилювача, то вихідна напруга ділиться за допомогою подільника напруги, утвореного резисторами R_1 та R_2 , частина якої, $U_{ін} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{вих}$ прикладається до інвертуючого входу операційного підсилювача. Внаслідок нульової різниці напруг між входами ідеального операційного підсилювача, яка викликана його нескінченим коефіцієнтом підсилення, напруга $U_{ін}$ дорівнює вхідній напрузі

$$U_{in} = U_{ex} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{вих}, \quad (6.24)$$

тому то

$$U_{вих} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{ex}. \quad (6.25)$$

Вихідна напруга збігається за фазою з вхідною напругою, а коефіцієнт підсилення для неінвертуючого підсилювача дорівнює

$$K_{неін} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right). \quad (6.26)$$

Приклад 6.3. Визначити вихідні напруги інвертуючого та неінвертуючого підсилювачів, якщо до входу прикладена напруга 0,1 В, а резистори зворотного зв'язку $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_2 = 100 \text{ кОм}$.

Розв'язання. Вихідна напруга інвертуючого підсилювача знаходиться за формулою

$$U_{вих} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{ex} = -0,1 \cdot \frac{100}{10} = -1В.$$

Вихідна напруга неінвертуючого підсилювача знаходиться за формулою

$$U_{вих} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{ex} = 0,1 \cdot \left(1 + \frac{100}{10}\right) = 1,1В.$$

Вимірювальні підсилювачі струму використовують для підсилення сигналів перетворювачів зі струмовим виходом – рисунок 6.13.

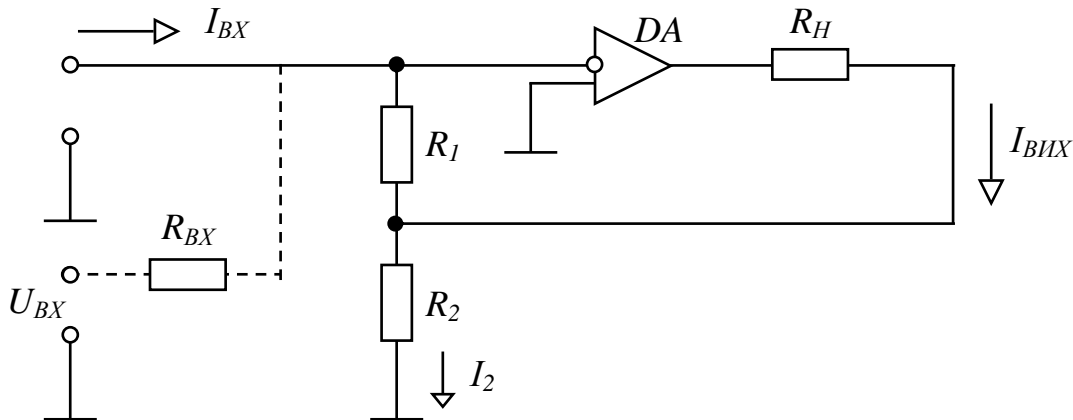


Рисунок 6.13 - Схема вимірювального перетворювача струму

Вхідним сигналом такої схеми є струм I_{ex} , що надходить на інвертуючий вхід операційного підсилювача або вхідним сигналом є напруга U_{ex} , що за допомогою додаткового вхідного резистора R_{ex} перетворюється на I_{ex} . Такий вимірювальний підсилювач має назву *кероване напругою джерело струму*. Вхідний струм такого підсилювача дорівнює

$$I_{вix} = -I_{ex} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right). \quad (6.27)$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 6

1 Визначити опір шунта, який підключений до міліамперметра класу точності 0,5 зі струмом повного відхилення рамки 300 мА і внутрішнім опором 0,2 Ом, якщо границя вимірювання нового амперметра 15 А.

2 Амперметр з границею вимірювання 25 А побудований на основі мілівольтметра магнітоелектричної системи класу точності 0,5 з максимальним відліком шкали 100, зі сталою за напругою 0,1 мВ/поділ. та внутрішнім опором 250 Ом підключений до шунта. Визначити опір шунта і потужність амперметра, яку споживає прилад під час вимірювання струму 20 А.

3 Розрахувати опір додаткового резистора, який підключений до вольтметра з максимальним відліком 100, зі сталою за напругою 0,5 В/поділ. і внутрішнім опором 15 кОм, якщо границя вимірювання нового вольтметра 450 В.

4 Визначити опір додаткового резистора, який підключений до вольтметра з границею вимірювання 75 В і власним споживанням потужності 0,95 Вт, якщо границя вимірювання нового вольтметра 300 В.

5 Амперметр електромагнітної системи з границею вимірювання 5 А, з максимальним відліком шкали 100 підключений до однофазного кола змінного струму через вимірювальний трансформатор струму з номінальним коефіцієнтом трансформації 75/5. Розрахувати силу струму у колі живлення споживача, якщо відлік за шкалою амперметра дорівнює «70». Представити схему вимірювання.

6 Обрати вимірювальний трансформатор струму з номінальним коефіцієнтом трансформації та очікуваний показ амперметра з границею вимірювання 5 А

для вимірювання сили струму величиною 55 A . Представити схему вимірювання.

7 Однофазний індукційний лічильник активної енергії включений до однофазного кола змінного струму через вимірювальні трансформатори струму $20/5$ та напруги $500/100$. Показання індукційного лічильника на початку місяця дорівнюють $250\text{ кВт}\cdot\text{год.}$, а наприкінці місяця – $760\text{ кВт}\cdot\text{год.}$ Визначити дійсну витрату активної енергії за поточний період. Представити схему вимірювання.

8 Визначити номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги, який з вольтметром з границею вимірювання 150 В використовується для вимірювань напруги 750 В .

9 Визначити вихідний струм вимірювального підсилювача струму, якщо на вхід надходить струму 2 мА , а резистори зворотного зв'язку $R_1 = 80\text{ кОм}$, $R_2 = 25\text{ кОм}$.

10 До однофазного кола змінного струму включений феродинамічний ватметр з границею вимірювання за струмом 5 А та з границею вимірювання за напругою 75 В , з максимальним відліком 150 поділок через вимірювальні трансформатори струму $80/5$ і напруги $500/100$. Визначити активну потужність однофазного кола змінного струму, якщо світловий показчик ватметра зупинився на позначці шкали «70». Представити схему вимірювання.

11 Розрахувати значення первинного струму у колі, якщо показ амперметра, який підключений до вторинного кола вимірювального трансформатора струму з номінальним коефіцієнтом $100/5$, дорівнює $4,2\text{ А}$.

12 Визначити активну потужність у вторинні колі вимірювального трансформатора струму з номінальним коефіцієнтом трансформації $50/5$, до якого підключений електродинамічний ватметр. Стала приладу дорівнює 5 Вт/поділ. , а стрілочний показчик приладу зупинився на позначці шкали «90».

13 Експериментатору необхідно обрати вимірювальні трансформатори струму та напруги, якщо відомо, що напруга живлення однофазного кола змінного струму дорівнює 450 В , а струм для живлення електричного навантаження дорівнює 6 А . Представити схему вимірювання.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 6

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

- 1 вимірювальний трансформатор струму
- 2 шунт
- 3 вимірювальний трансформатор напруги
- 4 додатковий резистор

2. За яким аналітичним виразом визначається опір шунта?

- 1 $k_{IH} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}}$
- 2 $R_D = R_{PV} \cdot (n - 1)$
- 3 $R_{ш1} = R_{PA} \cdot \frac{p_1}{p_1 - 1} \cdot \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right); R_{ш2} = R \cdot \frac{p_1}{(p_1 - 1) \cdot p_2}$
- 4 $R_{ш} = \frac{R_{PA}}{\frac{I}{I_{PA}} - 1} = \frac{R_{PA}}{p - 1}$

3. Який резистивний вимірювальний перетворювач напруги призначений для розширення меж вимірювань за напругою вольтметрів та приладів, що мають кола напруги?

- 1 вимірювальний трансформатор струму
- 2 шунт
- 3 вимірювальний трансформатор напруги
- 4 додатковий резистор

4. За яким аналітичним виразом визначається опір додаткового резистора?

- 1 $R_{ш} = \frac{R_{PA}}{\frac{I}{I_{PA}} - 1} = \frac{R_{PA}}{p - 1}$
- 2 $R_D = R_{PV} \cdot (n - 1)$
- 3 $k_{IH} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}}$
- 4 $R_{ш1} = R_{PA} \cdot \frac{p_1}{p_1 - 1} \cdot \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right); R_{ш2} = R \cdot \frac{p_1}{(p_1 - 1) \cdot p_2}$

5. Який вимірювальний перетворювач призначений для зменшення напруги у задану кількість разів у колах постійного та змінного струму, а також для розширення границі вимірювань за напругою приладів з великим входним опором?

- 1 шунт
- 2 додатковий резистор
- 3 подільник напруги
- 4 вимірювальний трансформатор струму

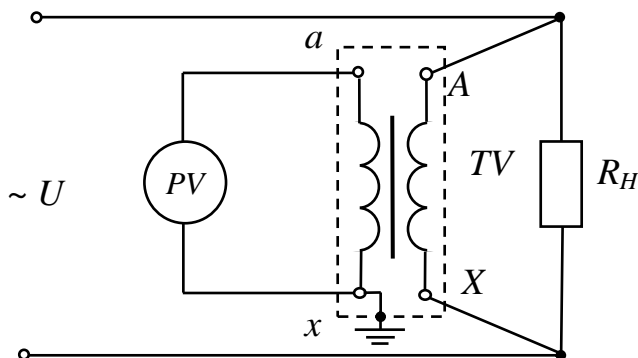
6. В яких умовах працює вимірювальний трансформатор струму?

- 1 в умовах, які наближені до холостого ходу
- 2 в умовах перевантаження
- 3 в умовах, які наближені до короткого замикання
- 4 в звичайних умовах

7. Чому повинна дорівнювати величина сили струму в однофазному колі змінного струму, якщо амперметр до кола включений через вимірювальний трансформатор струму з коефіцієнтом трансформації 10/5, а показ приладу дорівнює 4,0 А?

- | | | | |
|---|-------|---|-------|
| 1 | 4,0 А | 3 | 3,0 А |
| 2 | 8,0 А | 4 | 5 А |

8. Яке призначення наведеної схеми?



- 1 схема включення вимірювального трансформатора напруги та вольтметра до однофазного кола змінного струму
- 2 схема включення вимірювального трансформатора напруги та вольтметра до трифазного кола змінного струму
- 3 схема включення вимірювального трансформатора напруги та вольтметра до кола постійного струму
- 4 схема включення вимірювального трансформатора струму та вольтметра до однофазного кола змінного струму

9. До однофазного кола змінного струму включений феродинамічний ватметр з границею вимірювання за струмом 5 A та з границею вимірювання за напругою 300 V , зі шкалою на 150 поділок через вимірювальні трансформатори струму $10/5$ і напруги $500/100$. Визначити активну потужність, kW , однофазного кола змінного струму, якщо показ приладу дорівнює «70».

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1 $3,5\text{ kW}$ | 3 $5,0\text{ kW}$ |
| 2 $1,0\text{ kW}$ | 4 $7,0\text{ kW}$ |

10. Однофазний індукційний лічильник активної енергії включений до однофазного кола змінного струму через вимірювальні трансформатори струму $50/5$ та напруги $500/200$. Показання індукційного лічильника дорівнюють: на початку місяця $50\text{ kW}\cdot\text{год.}$, а наприкінці місяця – $160\text{ kW}\cdot\text{год.}$. Визначити дійсну витрату активної енергії, $\text{kW}\cdot\text{год.}$, за поточний період.

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 $2750\text{ kW}\cdot\text{год}$ | 3 $160\text{ kW}\cdot\text{год}$ |
| 2 $110\text{ kW}\cdot\text{год}$ | 4 $50\text{ kW}\cdot\text{год}$ |

11. Який масштабний вимірювальний перетворювач призначений для розширення границь вимірювань за напругою колах змінного струму?

- 1 шунт
- 2 вимірювальний трансформатор напруги
- 3 подільник напруги
- 4 додатковий резистор

12. Чи вірне твердження?

Вимірювальні підсилювачі є не тільки масштабними перетворювачами напруги, але й перетворювачами напруги на струм або струму на напругу?

- 1 не вірне
- 2 вірне

13. На якому явищі оснований принцип дії індуктивного подільника напруги?

- 1 на явищі електромагнетизму
- 2 на явищі взаємодії заряджених тіл
- 3 на явищі теплової дії струму
- 4 на явищі електромагнітної індукції

14. Для вимірювання струму в лінії без її розриву застосовують спеціальні вимірювальні трансформатори струму з роз'ємним осердям, які мають назву струмовимірювальні кліщі?

- 1 так
- 2 ні

15. З наведених в таблиці схем оберіть схему включення вольтметра з додатковим резистором.

1		3	
2		4	

16. З наведених в таблиці схем (питання 12) оберіть трансформаторну схему індуктивного подільника напруги.

17. З наведених в таблиці схем (питання 12) оберіть схему ємнісного подільника напруги.

18. Розрахувати значення первинної напруги у колі, якщо показ вольтметра, який підключений до вторинного кола вимірювального трансформатора напруги з номінальним коефіцієнтом 500/100, дорівнює 75 В.

- 1 75 В
- 2 100 В
- 3 375 В
- 4 500 В

19. Як аналітично визначається номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги?

$$1 \quad K_{UH} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{w_1}{w_2}$$

$$3 \quad K_I = \frac{w_1}{w_2}$$

$$2 \quad K_I = \frac{I_1}{I_2}$$

$$4 \quad K_{IH} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}} \approx \frac{w_1}{w_2}$$

20. В яких умовах працює вимірювальний трансформатор напруги?

1 в умовах перенавантаження

2 в умовах, які наближені до холостого ходу

3 в звичайних умовах

4 в умовах, які наближені до короткого замикання

РОЗДІЛ 7. МІРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

7.1 Загальні положення

Міра фізичної величини – це вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) збереження фізичної величини заданого розміру.

За кількістю відтворюваних розмірів міри поділяються на *однозначні* та *багатозначні*, за характером використання – на *переносні*, *стаціонарні* та *встановлювальні*, за видом фізичної величини – *міри фізичних величин* – рисунок 7.1.

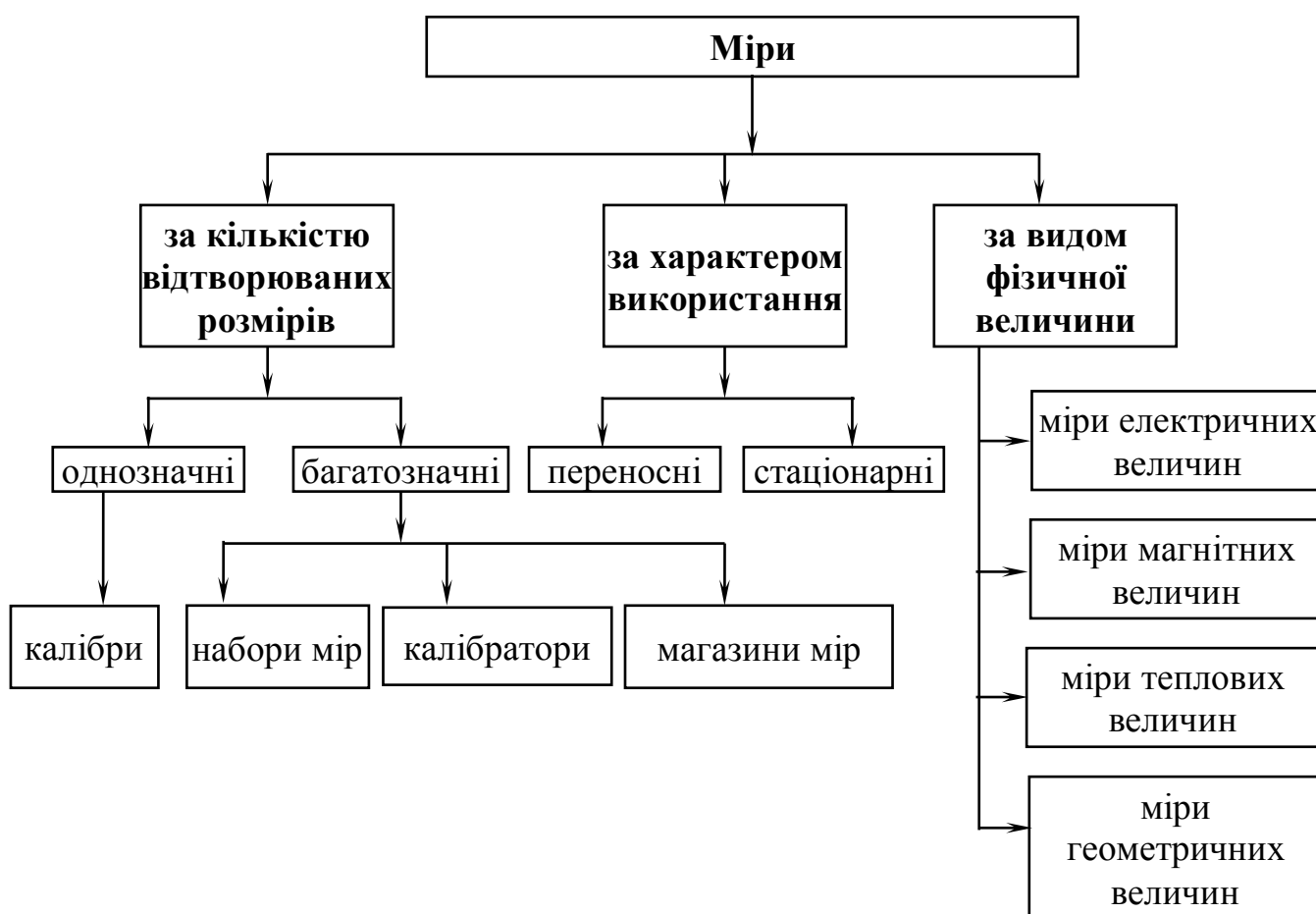


Рисунок 7.1 – Класифікація мір

Однозначна міра – це міра, що відтворює фізичну величину одного розміру. Наприклад, вимірювальна котушка електричного опору, нормальний елемент, конденсатор сталої ємності.

Багатозначна міра – це міра, що відтворює фізичну величину різних розмірів. Наприклад, конденсатор змінної ємності, магазин електричного опору. Багатозначні міри виготовляють у формі наборів мір, магазинів мір та калібраторів.

Набір мір – це комплект конструктивно відокремлених мір різного розміру однієї і тієї самої фізичної величини. Наприклад, набір резисторів. Міри, що входять в набір, можуть використовуватися як окремо, так і в різних комбінаціях для відтворення ряду розмірів цієї фізичної величини.

Магазин мір – це набір мір, які конструктивно об'єднані в одне ціле з пристроєм для вмикання їх у різних комбінаціях. Наприклад, магазини електричного опору, індуктивності та магазин ємності.

Калібратор – це багатозначна керована електронна міра, яка призначена для відтворення ряду розмірів однієї і тієї самої фізичної величини із заданої точністю та дискретністю. Наприклад, калібратори напруги постійного струму, калібратори сили постійного струму та калібратори електричного опору постійного струму.

Міра переносна – це автономний вимірювальний пристрій як у конструктивному виконанні, так і в застосуванні у вимірювальних операціях. Наприклад, магазин електричного опору.

Міра стаціонарна – це міра, яка конструктивно вмонтована у засіб вимірювальної техніки і є елементом його вимірювальної схеми або призначена для його метрологічної повірки. Наприклад, однозначна міра електричного опору, вмонтована в міст постійного струму, нормальний елемент, вмонтований у компенсатор постійного струму.

Основними метрологічними характеристиками міри є її номінальне значення та клас точності. Номінальне значення міри x_H – це значення фізичної величини, яке вона повинна відтворювати і яке вказане на ній або приписане їй. Крім номінального значення міри розрізняють істинне та дійсне або умовно-істинне значення міри. Істинне значення міри – це значення фізичної величини, що відтворюється мірою у певних умовах її застосування. Воно відрізняється

від номінального значення не тільки назвою, але й тим, що воно дорівнює розміру фізичної величини, який існує об'єктивно, в той час як номінальне значення має умовний характер.

Клас точності мір визначає границі допустимих основної та додаткових похибок, які виражають у формі зведених $\gamma_{м.зр.}$, відносних $\delta_{м.зр.}$ або абсолютних $\Delta_{м.зр.}$ похибок.

Теоретично абсолютну похибку міри визначають як різницю між номінальними значенням x_H та істинним значенням X величини, яку міра відтворює

$$\Delta_{м.зр.} = x_H - X. \quad (7.1)$$

А практично її оцінюють як

$$\Delta_{м.зр.} = x_H - x_{\partial}, \quad (7.2)$$

де x_{∂} – дійсне значення міри.

Абсолютну похибку міри за відомих номінального значення міри x_H і границі допустимої відносної основної похибки міри $\delta_{м.зр.}$ знаходять за формулою

$$\Delta_{м.зр.} = \pm \frac{\delta_{м.зр.} \cdot x_H}{100\%}. \quad (7.3)$$

7.2 Міри електрорушійної сили постійного струму

Мірою електрорушійної сили (ЕРС) постійного струму є нормальний елемент: гальванічний елемент з точно відомим і стабільним значенням ЕРС. Висока точність відтворення ЕРС забезпечується конструктивними особливостями, а саме, електролітом нормального елементу є водний розчин сульфату кадмію, позитивним електродом є ємність зі ртуттю і сульфати закису ртуті, негативним електродом є амальгама кадмію, а виводи електродів виконані з платинового дроту.

Залежно від стану електроліту нормальні елементи можуть бути *насиченими* і *ненасиченими*. В електроліті *насичених нормальних елементів* в діапазоні

робочих температур є надмір кристалів сульфату кадмію, а в ненасичених нормальних елементах електроліт є насичений і над амальгамою і сульфатом ртуті встановлені захисні коркові або пластмасові кільця, які обтягнуті шовковою тканиною. Нормальні елементи з рідким електролітом виготовляють в Н-подібних балонах, а з пастоподібним – у циліндричних балонах із скла. Для захисту від механічних пошкоджень балон нормального елемента поміщають в пластмасовий або металевий корпус.

Основними метрологічними характеристиками нормального елемента є: клас точності, значення ЕРС за нормальної температури, часова стабільність ЕРС, залежність ЕРС від температури, внутрішній опір та допустимий струм упродовж 1 хв.

Клас точності нормального елемента визначає границі його допустимої відносної основної похибки і йому відповідає допустима зміна ЕРС за один рік.

Ненасичені нормальні елементи мають високу точність і стабільність ЕРС, але недоліком є велика температурна залежність ЕРС, яка описується аналітичним виразом

$$E_{\Theta} = E_{\Theta_H} - \left[40,6 \cdot (\Theta_i - \Theta_H) + 0,95 \cdot (\Theta_i - \Theta_H)^2 - 0,01 \cdot (\Theta_i - \Theta_H)^3 \right] \cdot 10^{-6}, \quad (7.4)$$

де E_{Θ} , E_{Θ_H} – ЕРС нормального елемента при температурах Θ_i та Θ_H .

Насиченим нормальним елементам властива нижча точність, але їх ЕРС мало залежить від температури (не більше, ніж 0,0002 %/°C), що є їх основною перевагою перед насиченими нормальними елементами. Насичені нормальні елементи високих класів точності потребують термостатування. Нормальні елементи забороняється трясти, перевертати, перегрівати і перевантажувати.

Приклад 7.1 ЕРС нормального елемента типу Х482 при температурі $\Theta_H = 20^{\circ}\text{C}$ дорівнює 1,018715 В.

Визначити ЕРС E_{Θ} і поправку до ЕРС при температурі $\Theta_i = 22^{\circ}\text{C}$.

Розв'язання. Значення E_{Θ} обчислюється за формулою (7.4)

$$\begin{aligned} E_{\Theta} &= E_{\Theta_H} - \left[40,6 \cdot (\Theta_i - \Theta_H) + 0,95 \cdot (\Theta_i - \Theta_H)^2 - 0,01 \cdot (\Theta_i - \Theta_H)^3 \right] \cdot 10^{-6} = \\ &= 1,018715 - \left[40,6 \cdot (22 - 20) + 0,95 \cdot (22 - 20)^2 - 0,01 \cdot (22 - 20)^3 \right] \cdot 10^{-6} = 1,018631\text{В}. \end{aligned}$$

Значення поправки визначається за формулою

$$\sigma_{\ominus} = E_{\ominus} - E_{20} = 1,018631 - 1,018715 = -0,000084V.$$

Нормальні елементи використовуються як *робочі міри* ЕРС в різних засобах вимірювальної техніки, зокрема, у компенсаторах постійного струму, компараторах та цифрових вольтметрах, а також як *зразкові міри* ЕРС.

7.3 Міри електричного опору

Мірами електричного опору у колах постійного та змінного струму є: *вимірювальні котушки електричного опору* (однозначні міри електричного опору) та *магазини опору* (багатозначні міри електричного опору).

Характеристики таких мір залежать від матеріалу і технології виготовлення їх резистивних елементів.

До мір електричного опору висуваються такі *вимоги*: висока точність підгонки дійсного значення опору міри до номінального, висока відтворюваність опору міри і його стабільність в часі, малий температурний коефіцієнт опору та мінімально можлива термоелектрорушійна сила в парі з міддю.

Цим вимогам відповідає *манганін*, характеристики якого наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 - Характеристики манганіну

Найменування	Значення
1. Склад манганіну	мідь – 84%; марганець – 12%; нікель – 3%; домішки алюмінію та заліза
2. Питомий опір, Ом·м	$(0,42 \dots 0,48) \cdot 10^{-6}$
3. Термоелектрорушійна сила в парі з міддю, мкВ/°С	1,5...3,0
4. Температурний коефіцієнт опору, 1/°С	$\pm (3 \dots 40) \cdot 10^{-6}$

Для підвищення стабільності опору резистивні елементи МЕО під час виготовлення піддають штучному старінню (циклічному нагріванню та охоло-

дження), а готові – природному старінню (тривалому витримуванню за нормальної температури).

Розглянемо *однозначну міру електричного опору*, якою є вимірювальна котушка, що містить резистивний елемент (чотиризатискачевий резистор) в формі обмотки (при великому опорі), яка намотана на каркас або в формі спіралі чи петлі (при малому опорі). Виводи резистивного елементу приєднані до струмовиводів, які змонтовані на ізоляційній панелі. На струмопровідних колодках розміщені струмові затискачі для вмикання до кола струму та потенціальні затискачі для знімання спаду напруги вимірювального кола.

Для зменшення реактивної складової опору вимірювальних котушок застосовують спеціальні види намотування резистивного елемента і систему екранування для забезпечення сталості розподілення ємностей обмотки.

Основними метрологічними характеристиками однозначної міри електричного опору є: *клас точності, номінальне і дійсне значення опору міри, номінальне та максимальне значення потужності розсіювання*, означення яких наведені в таблиці 7.2.

У метрологічній практиці, окрім однозначних мір, використовують багатозначні міри електричного опору. *Багатозначна міра електричного опору* – це магазин опору, який за конструкцією є набором резисторів, які об'єднані перемикальним пристроєм, що забезпечує їх вмикання в різних комбінаціях і з потрібним значенням опору. Основним вузлом магазину опору є *декада* – це ряд послідовно з'єднаних резисторів, які конструктивно об'єднані перемикальним пристроєм. Кожній декаді відповідає певний десятковий розряд магазину і за допомогою її перемикача можна набрати від 0 до 20 (або до 9 чи 11) одиниць певного розряду.

Багатозначні міри в залежності від конструкції перемикальних пристроїв бувають *штупсельні* та *важільні*.

Таблиця 7.2 - Метрологічні характеристики однозначної міри електричного опору

Метрологічна характеристика	Означення
Клас точності	Клас точності дорівнює границі допустимої основної відносної похибки міри. Значення класу точності вибирають із ряду 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2.
Номінальне значення опору	таке значення опору, яке вказане на мірі або приписане їй. Вибирають із ряду 10^n Ом , де n – ціле число в діапазоні від мінус 5 до плюс 16.
Дійсне значення опору	таке значення опору, яке визначене під час метрологічної повірки міри і вказане в паспорті або в свідоцтві про повірку. Таке значення опору визначають з похибкою, не більшою від $1/5$ від класу точності міри.
Стабільність	характеризується зміною її опору за один рік та виражена у відсотках від номінального значення. Ця зміна для мір високих класів точності дорівнює класу точності міри, для менш точних мір стабільність опору не нормується.
Номінальна потужність розсіювання	така потужність, яка розсіюється мірою, за якої похибка не перевищує границі допустимої основної похибки і за якої допускається визначення дійсного значення опору міри при метрологічній повірці. Номінальна потужність дорівнює $0,1 \text{ Вт}$ для мір зі значенням опору 20^5 Ом .
Максимальна потужність розсіювання	така потужність, за якої допускається застосування міри у вимірювальних колах, але виникає додаткова похибка, яка не повинна перевищувати значення, що чисельно дорівнює класу точності міри. Максимальна номінальна потужність дорівнює 1 Вт для мір зі значенням опору 20^5 Ом .

На рисунку 7.2 наведена схема штепсельного магазину опору з неповною декадою, яка містить 4...5 резисторів. Магазины опорів бувають *одно-* і *багатодекадними*.

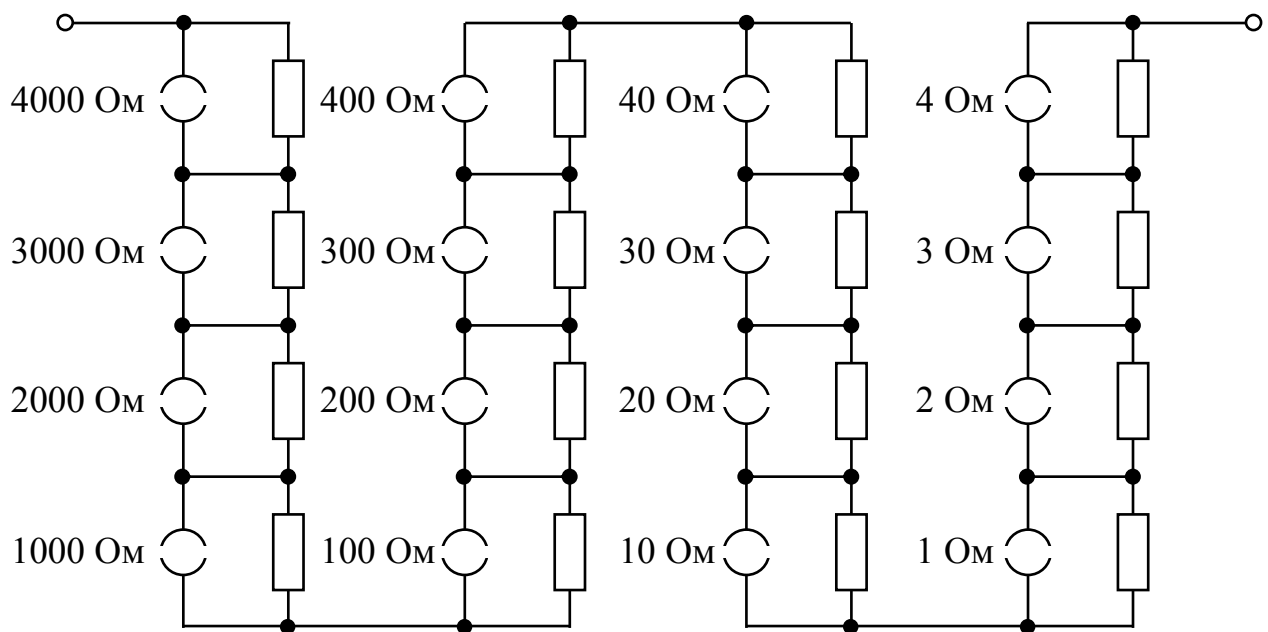


Рисунок 7.2 - Схема штепсельного магазину опорів з неповною декадою

Основними метрологічними характеристиками магазину опорів є клас точності, максимальний опір, кількість декад, опір одного ступеня молодшої декади, номінальна і допустима потужність на один ступінь опорів декади, початковий опір, варіація початкового опорів, а також стала часу і верхня границя частотного діапазону для магазинів опорів, які використовуються в колах змінного струму.

У практиці електричних вимірювань використовуються магазини опорів, в яких клас точності дорівнює 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2, номінальний опір одного ступеня молодшої декади дорівнює 0,01 або 0,1 Ом, старшої декади – 10^3 або 10^4 Ом, при цьому номінальна і допустима потужність одного ступеня опорів декади – 0,1 Вт, а допустима потужність – 0,5 Вт.

7.4 Міри індуктивності та взаємної індуктивності

На рисунку 7.3 наведена класифікація мір індуктивності та взаємної індуктивності.

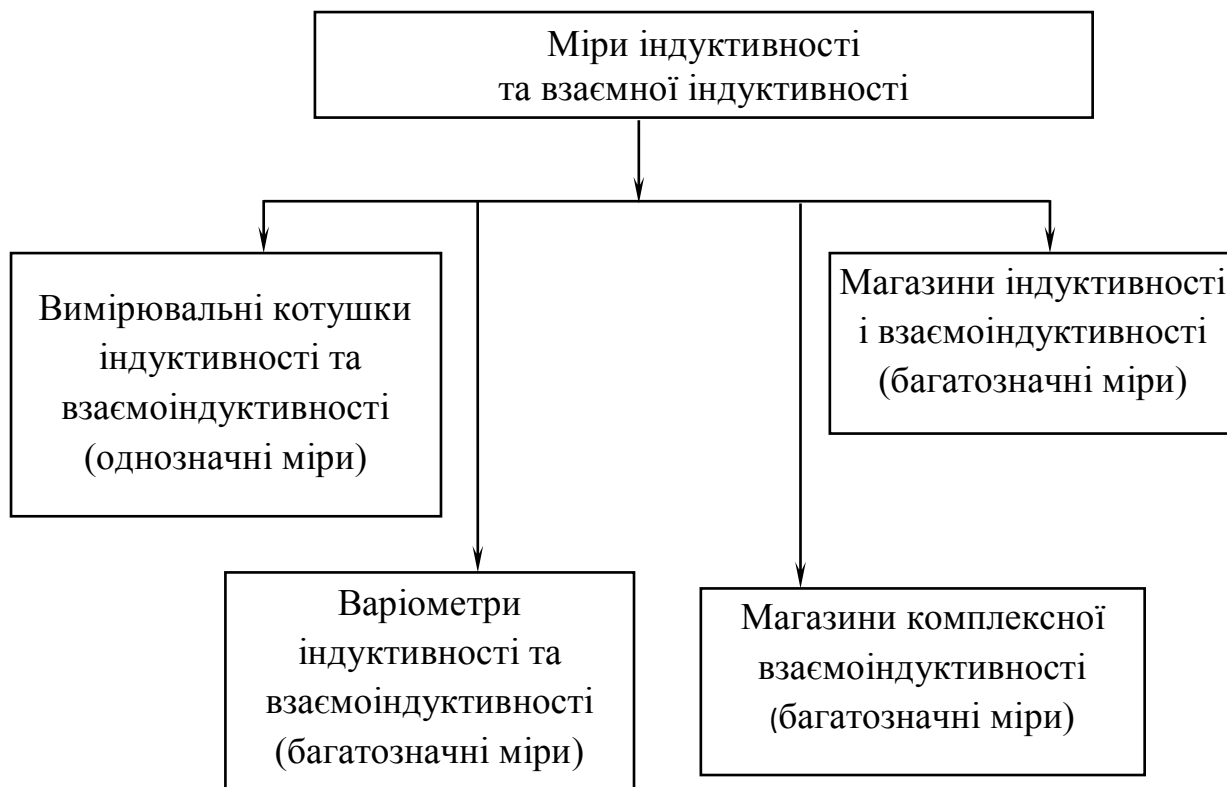


Рисунок 7.3 - Класифікація мір індуктивності та взаємної індуктивності

Основними вимогами до *мір індуктивності* є стабільність параметрів, мінімальний активний опір, незалежність індуктивності від значення струму через неї, мала залежність від частоти струму та температури довкілля. Усі вимоги забезпечуються як конструктивно, так і вибором відповідних матеріалів. Котушки індуктивності виготовляють у вигляді намотки з мідного проводу на ізоляційних каркасах. Малі значення залишкових параметрів отримують, використовуючи каркаси з матеріалів з магнітною проникністю, близькою до одиниці – фарфор, кераміка та кварцове скло. Для зменшення активного опору та частотних похибок за рахунок поверхневого ефекту застосовують багатоважильний мідний провід з ізольованими жилами. Для зменшення впливу зовнішніх електромагнітних полів на індуктивність використовують тороїдні конструкції, а для збільшення опору ізоляції обмотки котушок просочують спеціальними технічними оливами та заливають масою для фіксації. Зменшення впливу температури довкілля на значення міри досягається завдяки підбору матеріалів окремих

конструктивних елементів міри із однаковими (приблизно) температурними коефіцієнтами лінійного розширення.

Найпоширеніші котушки індуктивності мають номінальне значення індуктивності від 1 мкГн до 1 Гн , клас точності від $0,02$ до $0,2$, а верхню границю частоти змінного струму до 100 кГц .

Котушки взаємодуктивності за своєю будовою ідентичні з котушками індуктивності і відрізняються від них наявністю другої обмотки, первинна і вторинна обмотки можуть бути намотані роздільно або сумісно. Кількість витків обох обмоток вибирають такою, щоб номінальне значення індуктивності кожної із обмоток дорівнювало значення їх взаємної індуктивності.

Найпоширеніші котушки взаємодуктивності мають номінальне значення міри від 100 мкГн до 10 Гн , верхню границю основної допустимої похибки $\pm 0,1\%$.

Варіометри є багатозначними мірами індуктивності L та взаємодуктивності M з безперервною зміною L та M . Вони містять дві котушки – рухому (ротор) та нерухому (статор), при повороті ротора змінюється параметр L та M . Для варіометрів індуктивності ротор і статор з'єднані послідовно в одне електричне коло, а у варіометрів взаємної індуктивності – у різні електричні кола.

Магазини індуктивності і взаємодуктивності – це набори котушок сталлої індуктивності чи взаємної індуктивності, які конструктивно об'єднані в одному корпусі із штепсельним - рисунок 7.4, або важільним перемикальним пристроєм.

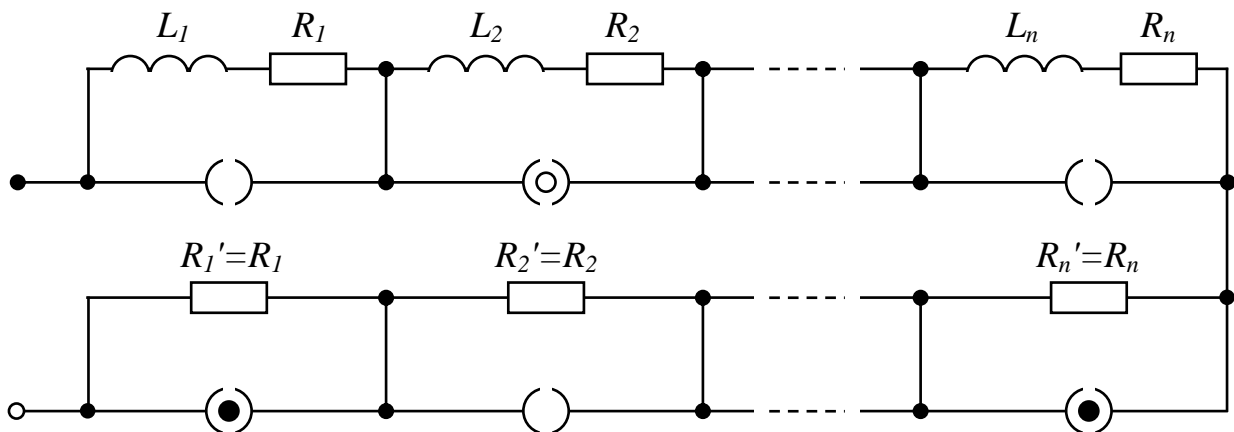


Рисунок 7.4 – Схема декади штепсельного магазину індуктивності

Особливістю магазинів індуктивності є те, що при будь-якому значенні індуктивності, його активний опір залишається сталим. Так у штепсельному магазині (див. рисунок 7.4) це забезпечується наявністю резисторів з опорам $R'_1 = R_1, R'_2 = R_2, \dots, R'_n = R_n$.

При установці штепселя із гнізда котушки індуктивності з верхнього ряду у розміщене гніздо резистора нижнього ряду вмикається котушка індуктивності, в відповідний резистор слід замкнути накоротко.

Основними метрологічними характеристиками мір індуктивності і мір ємності взаємної індуктивності є: номінальне значення індуктивності L_H та взаємної індуктивності M_H – для однозначних мір, максимальне значення L_{max} та M_{max} – для багатозначних мір, клас точності.

Клас точності однозначних мір індуктивності та взаємної індуктивності, варіометрів позначають одним числом c та вибирають з ряду: 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0.

Клас точності магазинів індуктивності і взаємної індуктивності позначають у вигляді відношення c/d та вибирають з ряду: 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0.

Границі допустимої відносної основної похибки $\delta_{L.гр}$ та $\delta_{M.гр}$, яка виражена у відсотках від номінального значення відповідно, індуктивності та взаємної індуктивності, визначається за формулами, які наведені в таблиці 7.3.

7.5 Міри ємності

Міри ємності – це вимірювальні конденсатори постійної ємності (*одзначні міри ємностей*) та конденсатори змінної ємності (*багатозначні міри*), магазини ємності та імітатори ємності.

До мір ємності висуваються такі вимоги: мінімальна залежність ємності від температури, часу, частоти і форми кривої струму, малий тангенс кута діелектричних втрат, великий опір і висока електрична міцність ізоляції.

Таблиця 7.3 - Формули для визначення допустимої відносної основної похибки

 $\delta_{L.зр}$ та $\delta_{M.зр}$ для мір індуктивності та взаємної індуктивності

Міра індуктивності та взаємної індуктивності	Формула	Номер формули
Однозначні міри, магазини індуктивності та взаємної індуктивності	$\delta_{L.зр} = \pm c, \%$	(7.5)
	$\delta_{M.зр} = \pm c \cdot \frac{M_{max}}{M}, \%$	(7.6)
Варіометри індуктивності та взаємної індуктивності	$\delta_{L.зр} = \pm c \cdot \frac{L_{max}}{L}, \%$	(7.7)
	$\delta_{M.зр} = \pm c \cdot \frac{M_{max}}{M}, \%$	(7.8)
Магазини індуктивності та взаємної індуктивності	$\delta_{L.зр} = \pm \left[c + d \left(\frac{L_{max}}{L} - 1 \right) \right], \%$	(7.9)
	$\delta_{M.зр} = \pm \left[c + d \left(\frac{M_{max}}{M} - 1 \right) \right], \%$	(7.10)

Для побудови однозначних та багатозначних мір ємностей застосовують вимірювальні *повітряні* конденсатори та конденсатори із *слюдяним, плівковим та керамічним слюдяним* твердим діелектриком.

Повітряним конденсаторам сталої ємності властива висока стабільність ємності у часі, малий кут витрат і малий температурний коефіцієнт ємності, але через малу діелектричну проникність повітря вони є громіздкими. Повітряні конденсатори змінної ємності конструктивно складаються з двох систем пластин – *нерухомої* (сталої) та *рухомої* (ротор) та шкали.

Найпоширеніші повітряні конденсатори сталої ємності виготовляють з номінальними значеннями від 50 до 4000 $n\Phi$, класу точності 0,05, їх можна використовувати у частотному діапазоні до 100 $\Gamma\mu$ і за напруги до 200 В.

Найпоширеніші повітряні конденсатори змінної ємності класів точності від 0,05 до 0,5 з максимальним значенням ємності 15...150 $n\Phi$ у частотному діапазоні до 100 $Гц$ і робочою напругою до 200 V .

У слюдяних конденсаторах електродами є алюмінієва або олов'яна фольга, а іноді – тонкий шар срібла, який нанесений на слюду. Слюдяні конденсатори компактні, їм властива, як і повітряним конденсаторам, висока стабільність ємності в часі і малий температурний коефіцієнт ємності, але дещо більший кут витрат.

Найпоширенішими є міри ємності з номінальними значеннями ємності від 1 $n\Phi$ до 1 $мк\Phi$, класів точності від 0,05 до 0,2, які розраховані на частотний діапазон від 40 до 10^5 $Гц$.

У конденсаторах зі значенням ємності понад 1 $мк\Phi$ як діелектрики використовують полімерні плівки.

Магазини ємності – це набір конденсаторів сталої ємності, які конструктивно об'єднані в одному корпусі із штепсельними – рисунок 7.5, або важільним перемикальним пристроєм.

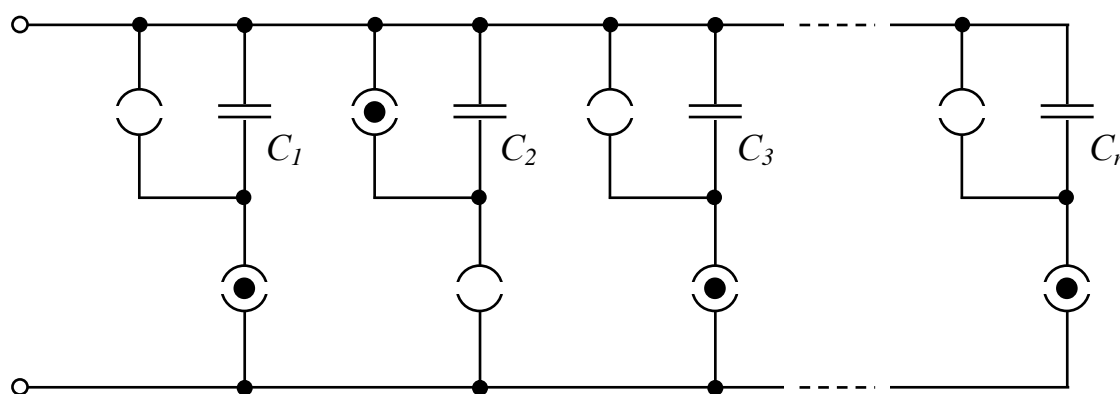


Рисунок 7.5 – Схема декади штепсельного магазину ємності

В штепсельних магазинах передбачені спеціальні гнізда для закорочення відімкнених конденсаторів з метою усунення їх залишкових зарядів.

Основними метрологічними характеристиками однозначних мір ємності і багатозначних мір ємності є: номінальне C_N (для однозначних мір) і максимальне значення ємності C_{max} (для багатозначних мір), клас точності, ємність

одного ступеня найменшої декади магазинів, значення тангенса кута втрат, додаткові частотна і температурна похибки.

Клас точності однозначних мір ємності і конденсаторів змінної ємності позначають одним числом k та вибирають з ряду: 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0.

Клас точності магазинів ємності позначають у вигляді відношення c/d та вибирають з ряду: 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0.

Границі допустимої відносної основної похибки $\delta_{C.зр}$, яка виражена у відсотках від номінального значення ємності мір, визначається за формулами, які наведені в таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 - Формули для визначення допустимої відносної основної похибки

$\delta_{C.зр}$ для мір ємності

Міра ємності	Формула	Номер формули
Однозначна міра ємності, магазини ємності	$\delta_{C.зр} = \pm k, \%$	(7.11)
Конденсатори змінної ємності	$\delta_{C.зр} = \pm k \cdot \frac{C_{max}}{C}, \%$	(7.12)
Магазини ємності	$\delta_{C.зр} = \pm \left[c + d \left(\frac{C_{max}}{C} - 1 \right) \right], \%$	(7.13)

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 7

- 1 Які переваги та недоліки однозначних мір напруги на основі нормальних елементів?
- 2 Якими параметрами характеризуються властивості однозначних мір опору на змінному струмі?
- 3 Як нормуються показники точності мір індуктивності та взаємоіндуктивності?

4 Охарактеризуйте конструктивні особливості однозначних та багатозначних мір електричного опору, мір індуктивності та взаємної індуктивності та мір ємності.

5 Як аналітично визначаються допустимі відносні основні похибки для мір індуктивності та взаємної індуктивності?

6 Як аналітично визначаються допустимі відносні основні похибки для мір ємності?

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 7

1 Визначити ЕРС нормального елемента типу Х480 при температурі 27°C , якщо при температурі 20°C ЕРС $E_{20} = 1,018584 \text{ В}$.

2 Визначити абсолютну похибку опору вимірювальної котушки опору типу Р4015 класу точності 0,005, якщо номінальне значення опору дорівнює 10^5 Ом .

3 Розрахувати граничні значення абсолютної похибки індуктивності $0,05 \text{ Гн}$ магазину індуктивності типу Р567, якщо $L_{max} = 0,1 \text{ Гн}$.

4 Обчислити граничне значення абсолютної похибки ємності 50 нФ магазину ємностей типу Р5025, якщо $C_{max} = 100 \text{ нФ}$.

5 Обчислити величину поправки до ЕРС нормального елемента типу Х488/1, який застосовують при температурі термостатування 30°C , якщо при температурі $\Theta_H = 27^{\circ}\text{C}$ його ЕРС дорівнює $1,018385 \text{ В}$.

5 Визначити граничне значення сумарної відносної похибки $\delta_{R_{zp}}$ однозначної міри опору типу Р331 з номінальним значенням опору $R_H = 1000 \text{ Ом}$, яку застосовують при температурі повітря 25°C , вологості повітря 80% і сили струму, що протікає по мірі, 30 мА .

6 Розрахувати граничні значення $\delta_{R_{zp}}$ і абсолютної похибки ΔR_{zp} похибки опору $R = 128 \text{ Ом}$, який встановлений на магазині опору типу МСР – 63 за нормальних умов.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 7

1. Який вимірювальний пристрій призначений для відтворення та (або) збереження фізичної величини заданого розміру?

- 1 вимірювальний прилад
- 2 вимірювальний перетворювач
- 3 міра фізичної величини
- 4 компаратор

2. Міра, що відтворює фізичну величину одного розміру, є ...

- 1 багатозначна міра
- 2 однозначна міра
- 3 переносна міра
- 4 стаціонарна міра

3. Набір мір, які конструктивно об'єднані в одне ціле з пристроєм для вмикання їх у різних комбінаціях, має назву ...

- 1 магазин мір
- 2 калібратор
- 3 стаціонарна міра
- 4 набір мір

4. Що є мірою електрорушійної сили постійного струму?

- 1 вимірювальні котушки електричного опору
- 2 багатозначна міра індуктивності – варіометр
- 3 нормальний елемент
- 4 вимірювальні конденсатори змінної ємності

5. Доповніть відповідь.

Вимірювальні котушки електричного опору (однозначні міри електричного опору) та магазини опору (багатозначні міри електричного опору) є мірами ...

- 1 індуктивності
- 2 ємності
- 3 електрорушійної сили постійного струму
- 4 електричного опору

6. Що є мірою ємності?

- 1 вимірювальні котушки електричного опору
- 2 багатозначна міра індуктивності – варіометр
- 3 вимірювальні конденсатори постійної та змінної ємності
- 4 нормальний елемент

7. За якої аналітичною формулою визначається допустима відносна основна похибка для магазинів індуктивності?

$$1 \quad \delta_{M.зр} = \pm c \cdot \frac{M_{max}}{M}$$

$$2 \quad \delta_{L.зр} = \pm \left[c + d \left(\frac{L_{max}}{L} - 1 \right) \right]$$

$$3 \quad \delta_{C.зр} = \pm \left[c + d \left(\frac{C_{max}}{C} - 1 \right) \right]$$

$$4 \quad \delta_{L.зр} = \pm c$$

8. За якою аналітичною формулою визначається допустима відносна основна похибка для магазинів ємності?

$$1 \quad \delta_{M.зр} = \pm c \cdot \frac{M_{max}}{M}$$

$$2 \quad \delta_{L.зр} = \pm \left[c + d \left(\frac{L_{max}}{L} - 1 \right) \right]$$

$$3 \quad \delta_{C.зр} = \pm k \cdot \frac{C_{max}}{C}$$

$$4 \quad \delta_{C.зр} = \pm \left[c + d \left(\frac{C_{max}}{C} - 1 \right) \right]$$

9. За якою аналітичною формулою визначається допустима відносна основна похибка для однозначних мір взаємної індуктивності?

$$1 \quad \delta_{L.zp} = \pm \left[c + d \left(\frac{L_{max}}{L} - 1 \right) \right]$$

$$2 \quad \delta_{M.zp} = \pm c \cdot \frac{M_{max}}{M}$$

$$3 \quad \delta_{C.zp} = \pm \left[c + d \left(\frac{C_{max}}{C} - 1 \right) \right]$$

$$4 \quad \delta_{L.zp} = \pm c$$

10. Яка міра фізичної величини є багатозначною?

1 це набір мір, які об'єднані в одне ціле

2 це багатозначна керована електронна міра

3 це міра, що відтворює фізичну величину різних розмірів

4 це міра, що відтворює фізичну величину одного розміру

РОЗДІЛ 8.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

8.1 Загальні положення

Електромеханічні вимірювальні прилади належать до аналогових засобів вимірювання.

Аналогові вимірювальні прилади – це засоби вимірювання, в яких візуальний сигнал вимірювальної інформації подається за допомогою шкали та покажчика.

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.

Як було зазначено в розділі 3, в пункті 3.5 (див. рисунок 3.11) електромеханічні аналогові прилади прямої дії складаються з вимірювального кола, з вимірювального механізму та з пристроєм відліку. У вимірювальному колі здійснюється кількісне чи якісне перетворення вимірюваної електричної величини X в електричну X' , 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 складається з нерухомої та з рухомої частин.

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 світловими пристроями відліку, а також стрілочними пристроями з антипаралаксними елементами (шкала із дзеркалами).

В таблиці 8.1 наведена інформація щодо моментів, які діють на рухому частину вимірювального механізму приладу при її русі.

Таблиця 8.1 - Моменти, що діють на рухому частину вимірювального механізму приладу

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», тому що $M_{пр}$ направлений назустріч $M_{об}$.
3. Момент заспокоєння, M_z	Момент характеризує процес гальмування, яке виникає при обертанні рухомої частини механізму в результаті тертя його рухомих частин з повітрям та в результаті електромагнітних процесів	$M_z = -p \frac{d\alpha}{dt},$ 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 $M_{об} = M_{пр}$.

Залежно від принципу дії вимірювального механізму – 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 8.2. та на рисунку 8.1.

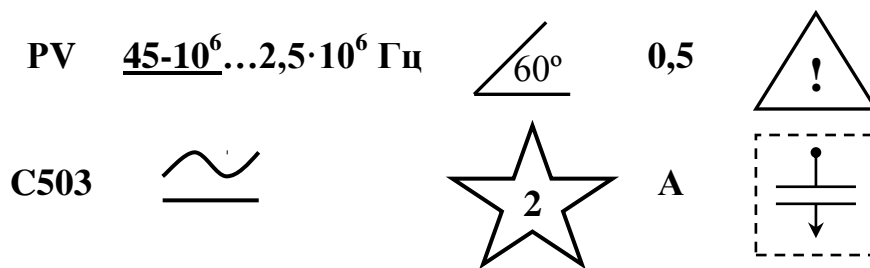


Рисунок 8.1 – Приклад умовних позначень на шкалі аналогового приладу

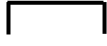


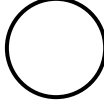

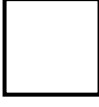





Таблиця 8.2 - Основні умовні позначення на шкалах аналогових електровимірювальних приладів

Назва	Умовне позначення
1.Позначення системи вимірювального механізму приладу:	
- магнітоелектричний механізм звичайний	
- магнітоелектричний механізм логометричний	
- електромагнітний механізм звичайний	

Продовження таблиці 8.2

Назва	Умовне позначення
- електромагнітний механізм логометричний	
- електродинамічний механізм звичайний	
- електродинамічний механізм логометричний	
- феродинамічний механізм звичайний	
- феродинамічний механізм логометричний	
- електростатичний механізм	
- індукційний механізм	
<i>2. Позначення роду струму:</i>	
- постійний струм	
- змінний однофазний струм	
- постійний і змінний струм	
- трифазний змінний струм	
- трифазний змінний струм з асиметричним навантаженням	




Продовження таблиці 8.2

Назва	Умовне позначення
3. Позначення нормального положення шкали приладу:	
- горизонтальне	
- вертикальне	
- установка шкали приладу під кутом (45...60...75°)	
4. Екранування та захист:	
- електростатичний екран	
- магнітний екран	
- захист від зовнішніх магнітних полів	
- захист від зовнішніх електричних полів	
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	

Продовження таблиці 8.2

Назва	Умовне позначення
- 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	
- магнітоелектричний прилад з електронним перетворювачем	
8. Додаткові елементи вимірювального кола:	
- шунт	
- додатковий резистор	
- додаткова індуктивність	
- затискач для заземлення	
9. Умови експлуатації приладу:	
- робота в сухих приміщеннях, що обігріваються	А
- 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	В
- робота в сухому і вологому тропічному кліматі	Г

Продовження таблиці 8.2

Назва	Умовне позначення
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
Орієнтація приладу в земному магнітному полі	
Увага! Прилад без інструкції не вмикати	
Обережно! Міцність ізоляції вимірювального кола не відповідає нормам!	

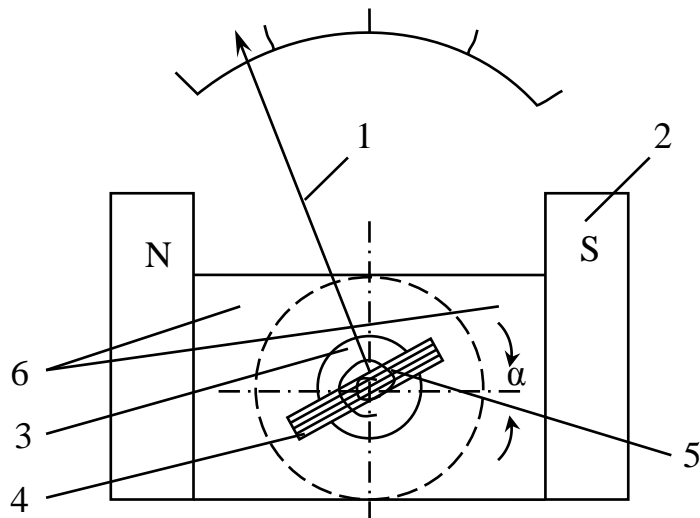
8.2 Магнітоелектричні вимірювальні прилади

8.2.1 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 8.2.

Постійний магніт, полюсні наконечники і циліндричне осердя – це магнітна система магнітоелектричного вимірювального механізму. В рівномірному проміжку між полюсними наконечниками б 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 показчик; 2 – постійний магніт;

3 – нерухоме циліндричне осердя; 4 - рухома котушка;

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

Рисунок 8.2 – Конструкція магнітоелектричного вимірювального приладу

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

Магнітне поле постійного магніту взаємодіє з тими частинами котушки, що знаходяться в просторі між полюсними наконечниками і осердям, як наслідок, створюється обертальний момент, який намагається повернути котушку так, щоб через площину, охоплену її витками, проходив максимальний магнітний потік. При повороті котушки на кут α закручуються спіральні пружини і створюється протидіючий момент. Поворот котушки припиниться, коли протидіючий момент стане рівним обертальному моменту, при такому стані рухомої частини приладу за положенням стрілочного показчика над шкалою оператором визначається значення вимірюваної величини.

Розглянемо аналітичні залежності, які описують теорію магнітоелектричного приладу:

- обертальний момент $M_{об}$

$$M_{об} = B \cdot S \cdot w \cdot I_o; \quad (8.1)$$

- протидіючий момент

$$M_{np} = -W_{nm} \cdot \alpha; \quad (8.2)$$

- функція перетворення магнітоелектричного приладу

$$\alpha = \frac{M_o}{W_{nm}} = \frac{B \cdot S \cdot w}{W_{nm}} \cdot I_o = S_I \cdot I, \quad (8.3)$$

де S_I – чутливість магнітоелектричного приладу за струмом

$$S_I = \frac{B \cdot S \cdot w}{W_{nm}}; \quad (8.4)$$

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.

8.2.2 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) монтуються 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*).

8.2.3 Магнітоелектричні омметри

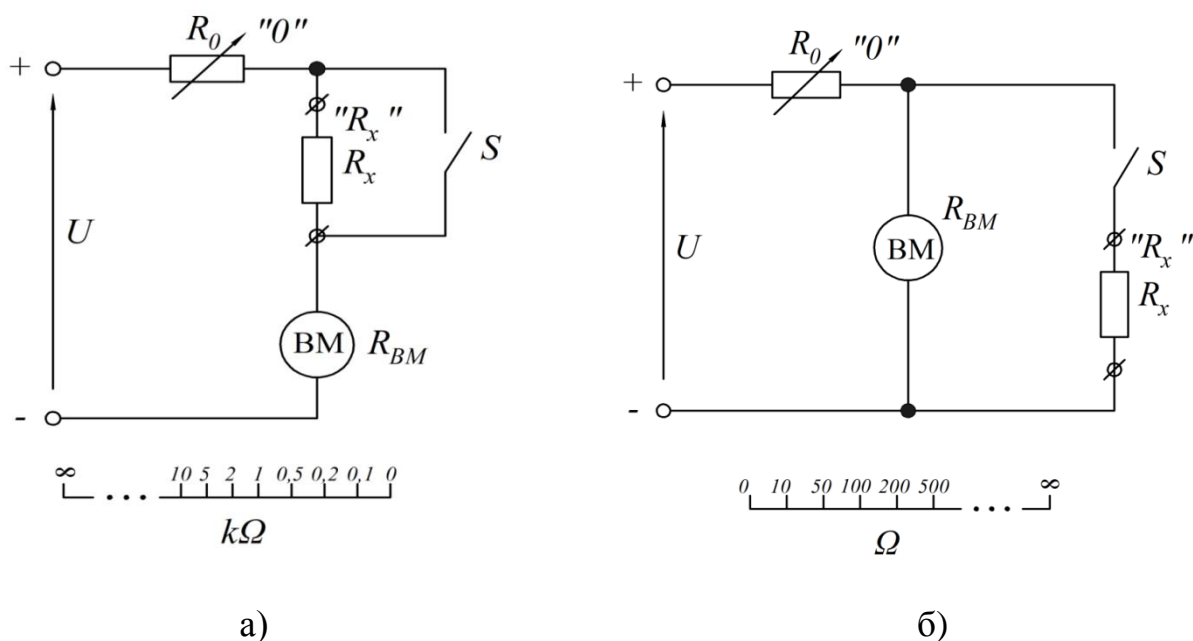
Омметри з магнітоелектричним вимірювальним механізмом побудовані за двома схемами: з *послідовним* (рисунок 8.3.а) і з *паралельним* (рисунок 8.3.б) вмиканням вимірювального опору R_x з вимірювальним механізмом (ВМ) приладу. У схемі (див. рисунок 8.3.а) вимірювальний опір R_x з'єднаний послідовно з вимірювальним механізмом магнітоелектричної системи з внутрішнім опором R_{BM} , тому то струм вимірювального механізму I_{BM} дорівнює

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM} + R_x}, \quad (8.5)$$

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.



а - з послідовним вмиканням; б - з паралельним вмиканням

Рисунок 8.3 – Схеми магнітоелектричних омметрів

Резистор регулювання R_0 призначений для встановлення нульового показу омметра «0» при закорочених входних 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

$$R_x \gg R_{BM}. \quad (8.6)$$

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 8.3.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

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM} + \frac{R_0 \cdot R_{BM}}{R_x}}, \quad (8.7)$$

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

$$R_x \ll R_{BM}. \quad (8.8)$$

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

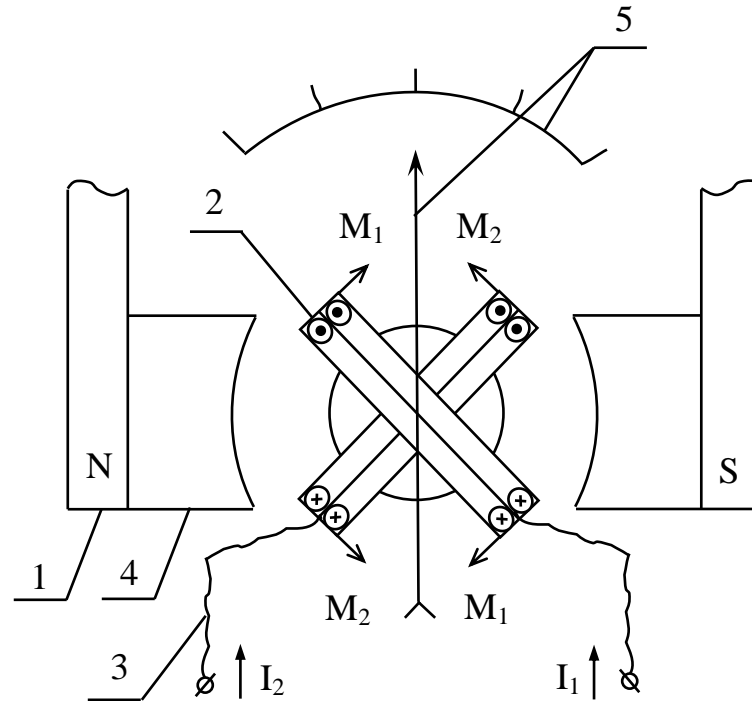
Омметри з магнітоелектричним вимірювальним механізмом виготовляються переносними з живленням від сухих елементів. У процесі експлуатації напруга на затискачах сухих елементів змінюється і може відрізнитись від тієї, яка була при заводському градуванні приладу. Тому перед кожним вимірюванням в омметрі 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 8.4 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 покажчик та шкала

Рисунок 8.4 – 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 8.5 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

$$I_1 = \frac{U}{R_{BM1} + R_x}; \quad I_2 = \frac{U}{R_{BM2} + R_0}. \quad (8.9)$$

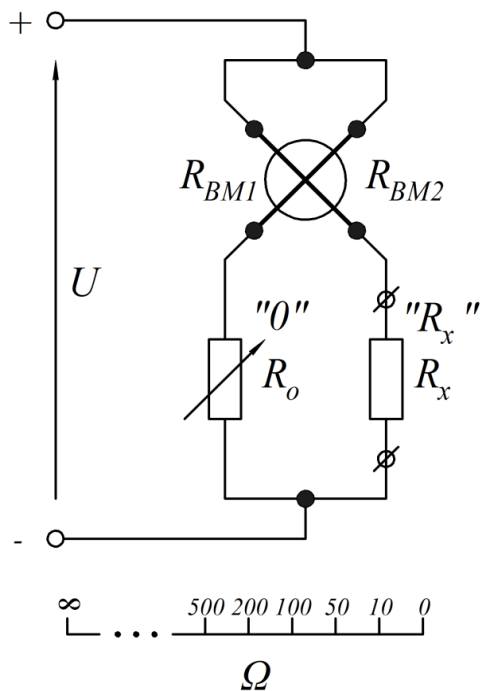


Рисунок 8.5 – Схема омметра з логотричним вимірювальним механізмом

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

Рівняння шкали омметра має вигляд

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_{BM2} + R_0}{R_{BM1} + R_x}\right) = f(R_x). \quad (8.10)$$

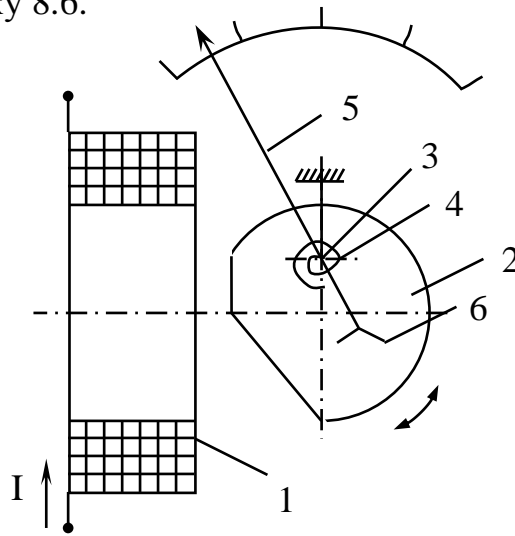
Як видно з виразу (8.10), покази омметра з логотричною схемою не залежать від напруги джерела живлення, але шкала обернена і також істотно нелінійна.

8.3 Електромагнітні вимірювальні прилади

8.3.1 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 8.6.



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

Рисунок 8.6 – 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 $M_{об}$

$$M_{об} = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2; \quad (8.11)$$

- протидіючий момент

$$M_{np} = W_{nm} \cdot \alpha; \quad (8.12)$$

- функція перетворення електромагнітного приладу

$$\alpha = \frac{1}{W_{nm}} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2, \quad (8.13)$$

де W_{nm} – питомий протидіючий момент пружини;

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

на кут α ;

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

на кут α .

Із виразу (8.13) 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.

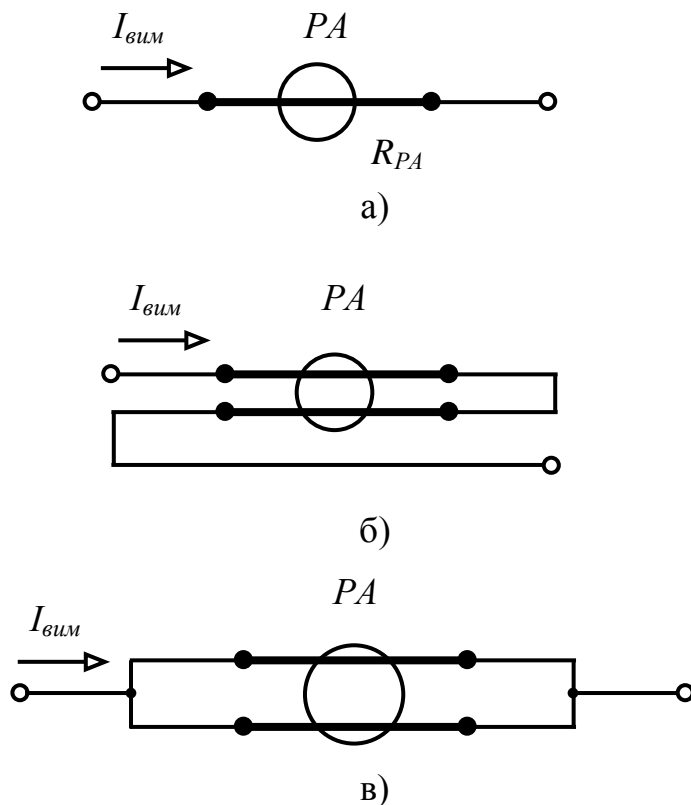
Методом підбору спеціальної конструкції рухомого осердя конструктори досягли такої залежності $\frac{dL}{d\alpha}$, за якої шкала приладу стала близької до лінійної в діапазоні 20...100 % всієї її довжини, але початкова ділянка шкали 0...20%, яка відмічена спеціальною точкою, є неробочою частиною шкали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

8.3.2 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 8.7.



а - однограничний щитовий амперметр;

б - переносний багатограничний 2-х секційний амперметр;

в - багатограничний амперметр при переключенні секцій з послідовного з'єднання на паралельне

Рисунок 8.7 – Схеми електромагнітних амперметрів

Як видно, з рисунку 8.7.а, амперметри є щитовими однограничними, з рисунку 8.7.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 8.7.в.

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 осерді, велике власне споживання потужності, великий вплив зовнішніх магнітних полів внаслідок слабкого власного магнітного поля та вузький частотний діапазон.

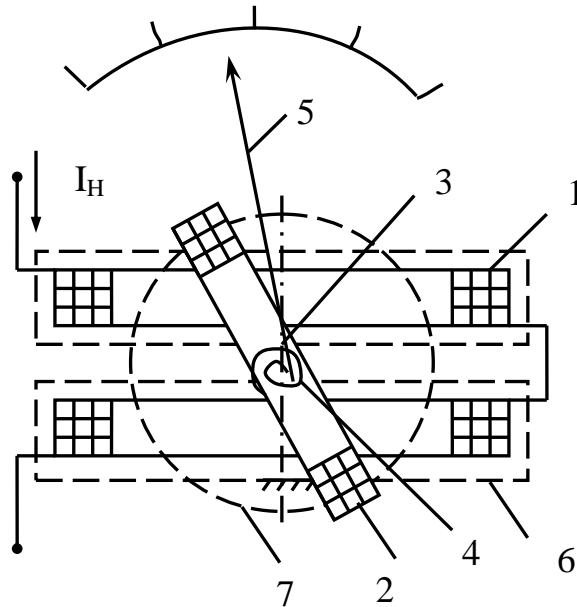
8.4 Електродинамічні та феродинамічні вимірювальні прилади

8.4.1 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 8.8.

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 рухому котушку так, щоб магнітні потоки котушок збіглися.



1 – нерухома двохсекційна котушка; 2 – рухома котушка; 3 – ось;
 4 – дві спіральні пружини; 5 – стрілочний показчик;
 6, 7 – осердя (для феродинамічного вимірювального механізму)
 Рисунок 8.8 – Конструкція електродинамічного та феродинамічного
 вимірювального приладу

Розглянемо аналітичні залежності, які описують теорію електродинамічного приладу

- обертальний момент

$$M_{об} = k \cdot I_{H.к} \cdot I_{P.к} \cdot \cos \psi \frac{dM_{H.к, P.к}}{d\alpha}; \quad (8.14)$$

- протидіючий момент

$$M_{np} = \alpha \cdot W; \quad (8.15)$$

- функція перетворення електромагнітного приладу

$$\alpha = \frac{I_{H.к} \cdot I_{P.к} \cos \psi}{W_{nm}} \frac{dM_{H.к, P.к}}{d\alpha} = S \cdot I_{H.к} \cdot I_{P.к} \cdot \cos \psi, \quad (8.16)$$

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

W_{nm} – питомий протидіючий момент пружини;

k – конструктивна стала приладу;

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

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

при переміщенні 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 8.8): 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. Результируючий 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.

8.4.2 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 8.9.

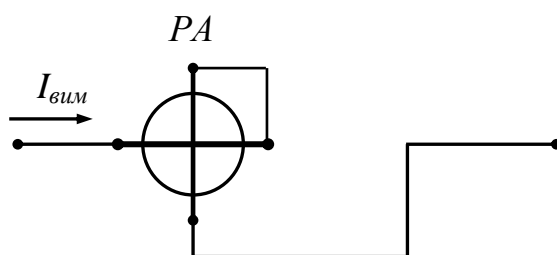


Рисунок 8.9 – Схема послідовного з'єднання котушок електродинамічного амперметра

При великих струмах (до 10 А) котушки з'єднуються паралельно - рисунок 8.10.

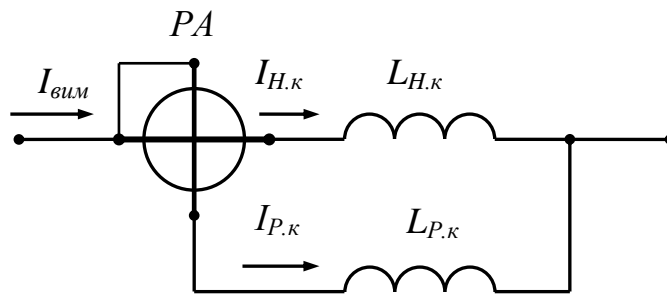


Рисунок 8.10 – Схема паралельного з'єднання котушок електродинамічного амперметра

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

$$\alpha = \frac{k}{W_{nm}} \cdot I^2 \cdot \frac{dM_{H.к, P.к}}{d\alpha} = S_I \cdot I, \quad (8.17)$$

де S_I – чутливість амперметра

$$S_I = \frac{k}{W_{nm}} \cdot \frac{dM_{H.к, P.к}}{d\alpha}. \quad (8.18)$$

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 8.11.

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

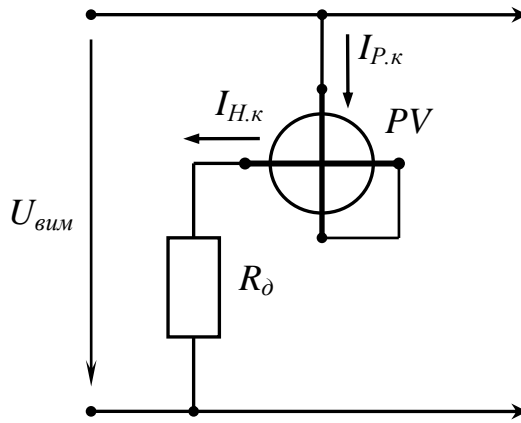


Рисунок 8.11 - Схема з'єднання котушок електродинамічного вольтметра

Функція перетворення електродинамічного вольтметра має вигляд

$$\alpha = \frac{k}{W_{nm} \cdot R_{PV}^2} \cdot U^2 \cdot \frac{dM_{H.k,P.k}}{d\alpha} = S_U \cdot U^2, \quad (8.19)$$

де S_U – чутливість вольтметра.

$$S_U = \frac{k}{W_{nm} \cdot R_{PV}^2} \cdot \frac{dM_{H.k,P.k}}{d\alpha}, \quad (8.20)$$

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.

8.4.3 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 8.12 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.

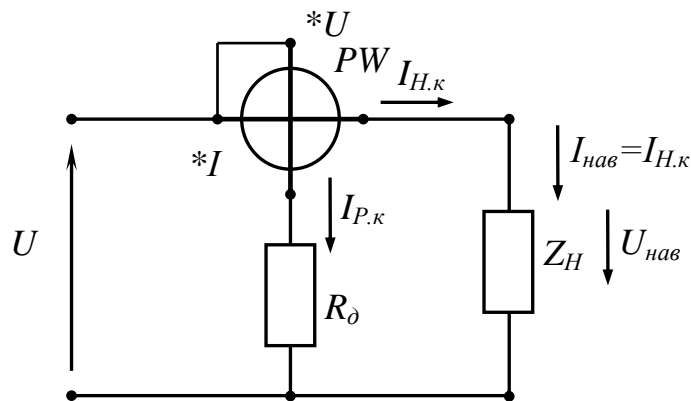


Рисунок 8.12 - Схема підключення котушок ватметра до навантаження

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

$$\alpha = \frac{k}{W_{nm} \cdot R_{обмU}} \cdot U \cdot I \cdot \frac{dM_{H.к,P.к}}{d\alpha} = S_P \cdot P, \quad (8.22)$$

де S_P – чутливість ватметра;

$$S_P = \frac{k}{W_{nm} \cdot R_{обмU}} \cdot \frac{dM_{H.к,P.к}}{d\alpha}. \quad (8.23)$$

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

$$\delta_{PW} = \arctg \frac{\omega L_{обм.U}}{R_{обм.U}}. \quad (8.24)$$

Функція перетворення ватметра на змінному струмі має вигляд

$$\alpha = \frac{1}{W_{nm}} \cdot \frac{dM_{H.к,P.к}}{d\alpha} \cdot I_{H.к} \cdot I_{P.к} \cdot \cos(\varphi - \delta_{PW}), \quad (8.25)$$

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 8.13 наведена схема підключення котушок варметра до навантаження.

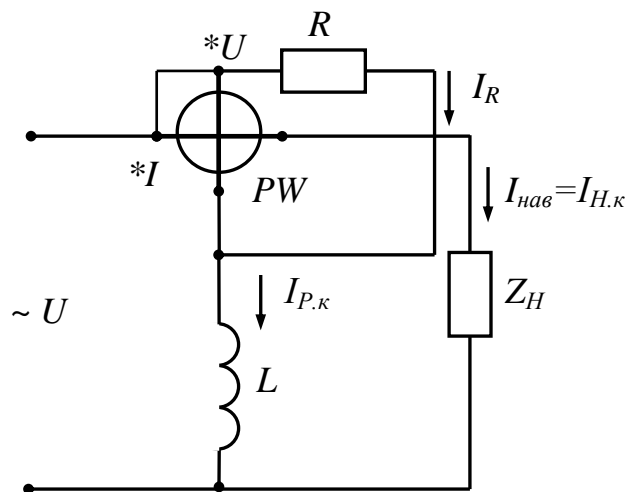


Рисунок 8.13 - Схема підключення котушок варметра до навантаження

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 $I_{P.к}$ у колі напруги дорівнював $90^\circ - \varphi$. Для

цього, як видно з рисунку 8.13, рухома котушка шунтується резистором R , а послідовно з нею вмикається котушка індуктивності L .

Функція перетворення варметра має вигляд

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{W_{nm}} \cdot \frac{dM_{H.K.P.K}}{d\alpha} \cdot I_{H.K} \cdot I_{P.K} \cdot \cos(90 - \varphi) = \\ &= S_Q \cdot I_{H.K} \cdot I_{P.K} \sin \varphi = S_Q \cdot U \cdot I \sin \varphi = S_Q \cdot Q, \end{aligned} \quad (8.27)$$

де S_Q – чутливість варметра.

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

8.4.4 Електродинамічний частотомір

Схема електродинамічного частотоміра на основі логометричного механізму наведена на рисунку 8.14.

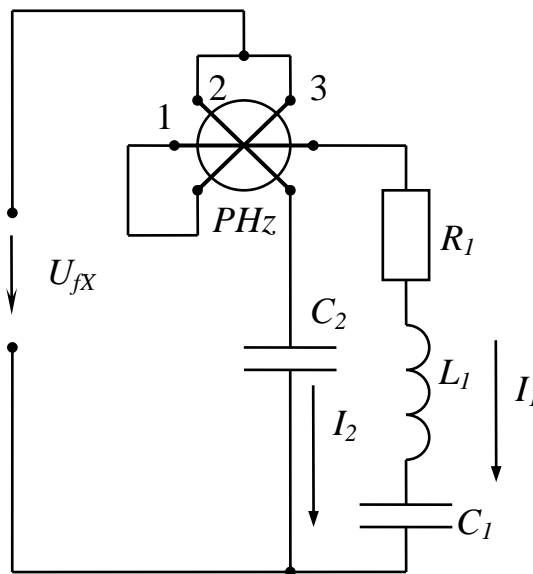


Рисунок 8.14 - Схема електродинамічного частотоміра на основі логометричного механізму

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

$$M_{o62} = \kappa_2 \cdot I_2 \cdot I_1 \cos 90^\circ \cdot f_1(\alpha) = 0, \quad (8.28)$$

де κ_2 – постійний коефіцієнт.

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

$$M_{o63} = \kappa_3 \cdot I_1^2 \cdot f_2(\alpha) \neq 0, \quad (8.29)$$

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 відрізнятись 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.

8.4.5 Електродинамічний фазометр

Схема електродинамічного фазометра на основі логометричного механізму наведена на рисунку 8.15. 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 8.16 наведена векторна діаграма для пояснення фізичних процесів в електродинамічному фазометрі. В такому вимірному механізмі

при протіканні струмів через котушки створюються два обертальні моменти, які дорівнюють

$$M_{об2} = I_2 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}; \quad (8.30)$$

$$M_{об3} = I_3 \cdot I_1 \cdot \cos(\beta - \varphi) \frac{dM_{1,3}}{d\alpha}, \quad (8.31)$$

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 .

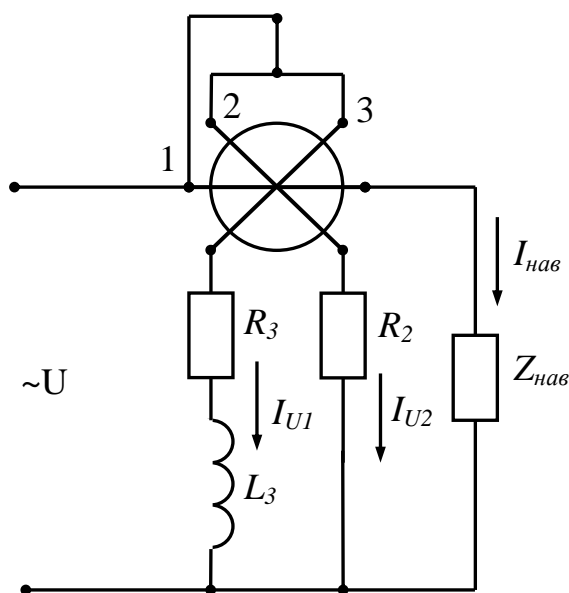


Рисунок 8.15 – Схема електродинамічного фазометра на основі логометричного механізму

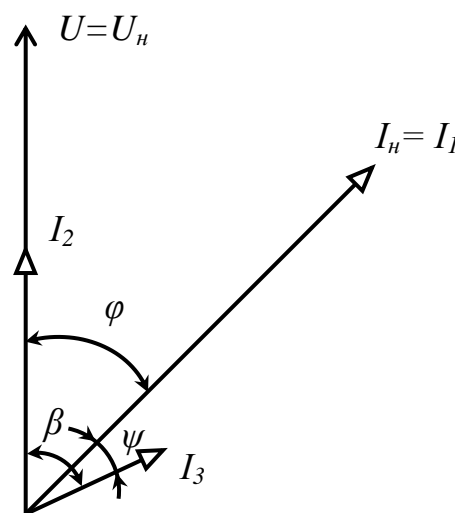


Рисунок 8.16 – Векторна діаграма фазометра

Якщо

$$\frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = f_1(\alpha); \quad (8.32)$$

$$\frac{dM_{1,3}}{d\alpha} = f_2(\alpha), \quad (8.33)$$

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

$$\frac{f_1(\alpha)}{f_2(\alpha)} = f(\alpha) = \frac{I_3 \cos(\beta - \varphi)}{I_2 \cos \varphi}. \quad (8.34)$$

Функція перетворення фазометра має вигляд

$$\alpha = f\left(\frac{I_3 \cos(\beta - \varphi)}{I_2 \cos \varphi}\right). \quad (8.35)$$

Таким чином, в електродинамічному логометрі 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.

8.5 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 8.17. 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.

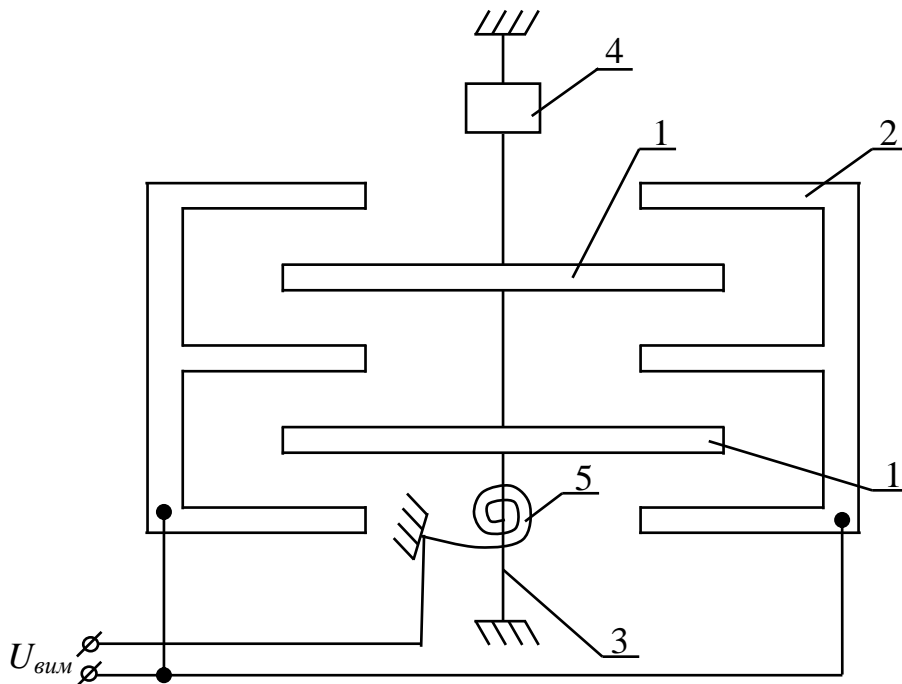
Розглянемо аналітичні залежності, які описують теорію електростатичного приладу на постійному струмі:

- енергія електростатичного поля

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2; \quad (8.36)$$

- обертальний момент $M_{об}$

$$M_{об} = \frac{dE}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot \frac{dC}{d\alpha}; \quad (8.37)$$



1 – система рухомих пластин; 2 – система рухомих пластин; 3 – ось;
4 – механізм передачі до стрілочного показчика; 5 – спіральна пружина
Рисунок 8.17 - Конструкція електростатичного вимірювального приладу

- протидіючий момент

$$M_{np} = W_{nm} \cdot \alpha; \quad (8.38)$$

- функція перетворення електростатичного приладу

$$\alpha = \frac{1}{2W_{nm}} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 = S_U \cdot U^2, \quad (8.39)$$

де S_U – чутливість електростатичного приладу до напруги;

$$S_U = \frac{1}{2W_{nm}} \cdot \frac{dC}{d\alpha}, \quad (8.40)$$

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 (8.40) 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 8.18.

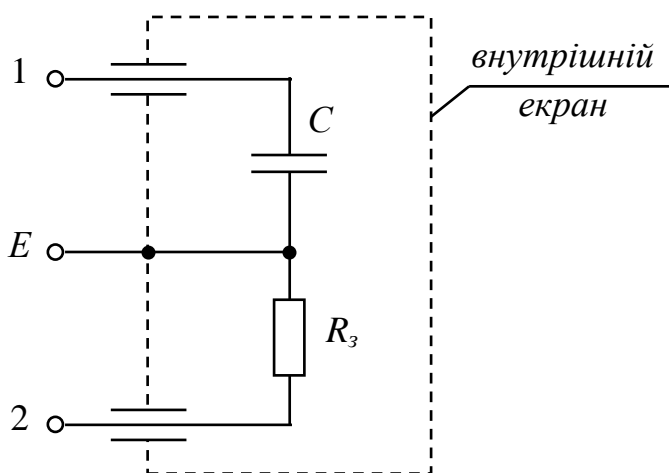


Рисунок 8.18 – Схема електростатичного вольметра з захисним екраном

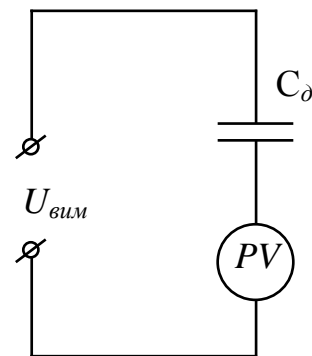


Рисунок 8.19 – Схема включення вольметра через додатковий конденсатор

На покази електростатичних вольметрів мало впливають температура, зовнішні магнітні поля, частота струму, форма кривої напруги, тому то такі вольметри можуть застосовуватись для вимірювання напруг високих частот – до 10 МГц. Споживання потужності електростатичних вольметрів від джерела живлення доволі мале.

Для розширення меж вимірювань електростатичних вольтметрів використовують додаткові конденсатори на змінному струмі – рисунок 8.19.

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 8.18) для захисту вимірювального механізму від короткого замикання між пластинами при високій напрузі.

8.6 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 8.20.

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_U , 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.

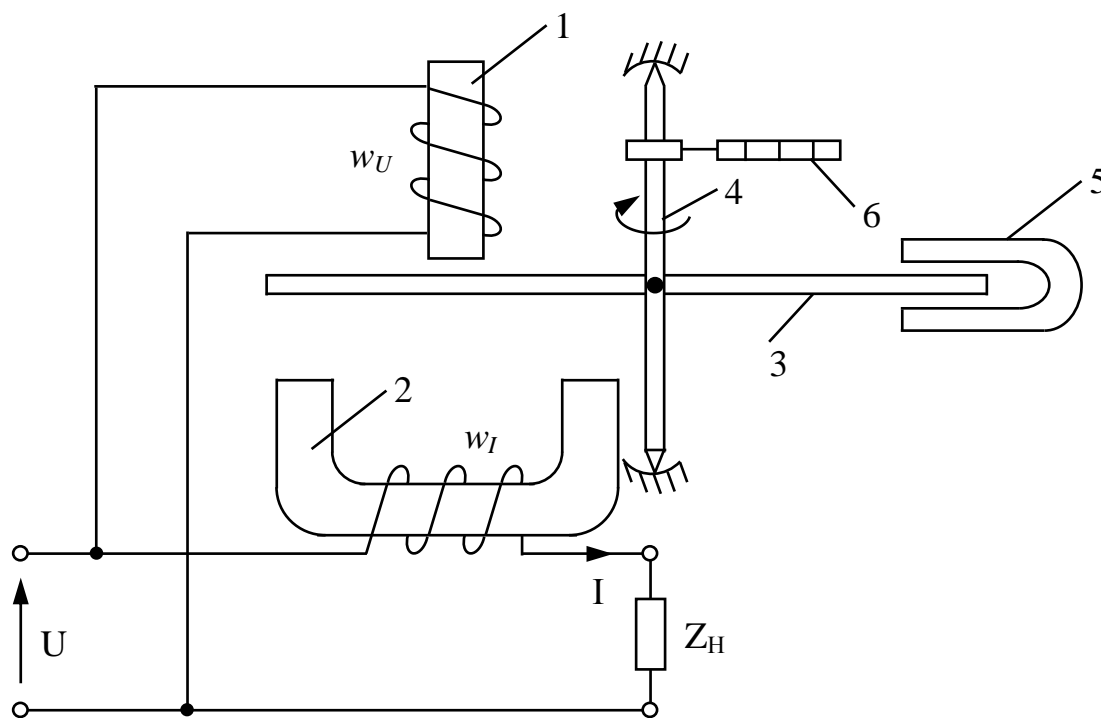


Рисунок 8.20 - Спрощена конструкція і схема увімкнення індукційного лічильника

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

$$\Phi_I = k_2 \cdot I. \quad (8.41)$$

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 90^0 .

Струм I_U створює в електромагніті 1 магнітний потік

$$\Phi_U = k_1 \cdot I_U \cong k_1 \cdot \frac{U}{\omega \cdot L_U}, \quad (8.42)$$

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

$$M_{об} = k_{об} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cong k_{об} \cdot P, \quad (8.43)$$

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

$$M_z = k_m \cdot \Phi_m^2 \cdot \frac{d\alpha}{dt} = k_z \cdot \frac{d\alpha}{dt}, \quad (8.44)$$

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 $M_{об} = M_z$

$$k_{об} \cdot P = k_2 \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \quad (8.45)$$

Після інтегрування виразу (8.45) на проміжку часу $\Delta t = t_2 - t_1$, отримуємо функцію перетворення індукційного вимірювального механізму

$$\alpha = \frac{k_{об}}{k_2} \cdot \int_{t_1}^{t_2} P dt = \frac{k_{об}}{k_2} \cdot W, \quad (8.46)$$

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

$$n = \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{k_{об}}{k_2 \cdot 2\pi} = \frac{W}{C_H} = A_n \cdot W, \quad (8.47)$$

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 , $Вт \cdot год / об.$, і номінальне передатне число зв'язані співвідношенням

$$C_H = \frac{10^3}{A_n}. \quad (8.48)$$

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

$$W = 10^3 \cdot n \cdot C_H \cdot \frac{1 \cdot n}{A_n}. \quad (8.49)$$

В таблиці 8.3 наведені основні метрологічні характеристики індукційних лічильників активної електричної енергії.

Таблиця 8.3 - 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, $кВт \cdot год/об.$
Номінальне передаточне число, A_H	Кількість обертів диска на $1 кВт \cdot год/об.$
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 $U_{НЛ}$.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 8

- 1 На які два великі класи поділяють аналогові вимірювальні прилади?
- 2 Дайте поняття електромеханічного вимірювального приладу. Які дві основні частини входять до його складу?
- 3 Які функції виконує вимірювальне коло?
- 4 Назвіть основні складові рухомої частини електромеханічного вимірювального механізму.
- 5 Сформулюйте сутність фізичного ефекту, який покладено в основу роботи магнітоелектричних вимірювальних приладів.

- 6 Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії магнітоелектричного вимірювального приладу.
- 7 Обґрунтуйте, що галузь застосування магнітоелектричного вимірювального приладу – це вимірювання постійних струмів.
- 8 Як визначити сталу магнітоелектричного приладу та його чутливість до приєднання шунта та після приєднання шунта?
- 9 Сформулюйте правило включення магнітоелектричного вимірювального приладу, щоб б він реалізував функції вольтметра.
- 10 Як визначити сталу магнітоелектричного приладу та його чутливість до приєднання додаткового резистора та після приєднання додаткового резистора?
- 11 Як визначити нову межу вимірювання вольтметра при відомих значеннях опору додаткового резистора, вимірювального механізму та верхній границі вимірювання? Виведіть аналітичну залежність.
- 12 Наведіть дві схеми омметрів на основі магнітоелектричного вимірювального приладу.
- 13 Наведіть схеми логометричного омметра та опишіть принцип його дії.
- 14 Сформулюйте сутність фізичного ефекту, який покладено в основу роботи електромагнітних вимірювальних приладів.
- 15 Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії електромагнітного вимірювального приладу.
- 16 Обґрунтуйте, що галузь застосування електромагнітного вимірювального приладу – це вимірювання постійних та змінних струмів.
- 17 Сформулюйте сутність фізичного ефекту, який покладено в основу роботи електродинамічних вимірювальних приладів.
- 18 Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії електродинамічного вимірювального приладу.
- 19 Обґрунтуйте, що галузь застосування електродинамічного вимірювального приладу – це вимірювання постійних та змінних струмів.
- 20 Наведіть схему і поясніть принцип дії електродинамічного амперметра.
- 21 Наведіть схему і принцип дії електродинамічного вольтметра.

22 Сформулюйте правило включення електродинамічного вимірювального приладу для реалізації функції ватметра. Наведіть схему електродинамічного ватметра.

23 Покажіть відмінності феродинамічного вимірювального механізму від електродинамічного. Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії феродинамічного вимірювального механізму.

24 Сформулюйте сутність фізичного ефекту, який покладено в основу роботи електростатичних вимірювальних приладів.

25 Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії електростатичного вимірювального приладу.

26 Обґрунтуйте, що галузь застосування електростатичного вимірювального приладу – це вимірювання постійних та змінних напруг.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 8

1 Амперметр магнітоелектричної системи без шунта має внутрішній опір 1 Ом і шкалу з максимальним відліком 100 та сталою $0,001 \text{ А/поділ}$. Визначити границю вимірювання і сталу амперметра при під'єднанні до нього шунта з опором $52,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$.

2 Для вольтметра електромагнітної системи з внутрішнім опором 30 кОм та струмом повного відхилення 30 мА визначити границю вимірювання та опір додаткового резистора, який необхідний для розширення границі вимірювання до 600 В . Визначити струм і чутливість вольтметра до і після розширення границі вимірювання, якщо максимальний відлік на його шкалі дорівнює 150 .

3 Вольтметр електромагнітної системи з границею вимірювання 100 В та з максимальним відліком на його шкалі 75 застосовується з вимірювальним трансформатором напруги з коефіцієнтом трансформації $1000/100$. Визначити значення вимірюваної напруги, якщо його вказівник зупинився на позначці 65 .

4 Амперметр електромагнітної системи з границею вимірювання 5 А і з максимальним відліком 150 призначений для роботи з вимірювальним трансформатором струму з коефіцієнтом трансформації $25/5$. Визначити сталу і чутливість.

5 Ватметр з границями вимірювання $2,5 A$ і $300 B$ та з максимальним відліком 150 увімкнений в коло однофазного споживача змінного струму через вимірювальний трансформатор струму 75/5 та вимірювальний трансформатор напруги 600/100. Записати результат вимірювання потужності, якщо відлік на шкалі ватметра 125.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 8

1. В яких аналогових вимірювальних приладах електрична величина перетворюється в лінійне або кутове переміщення рухомої частини вимірювального механізму?

- 1 в електронних приладах
- 2 в цифрових приладах
- 3 в реєструвальних приладах
- 4 в електромеханічних приладах

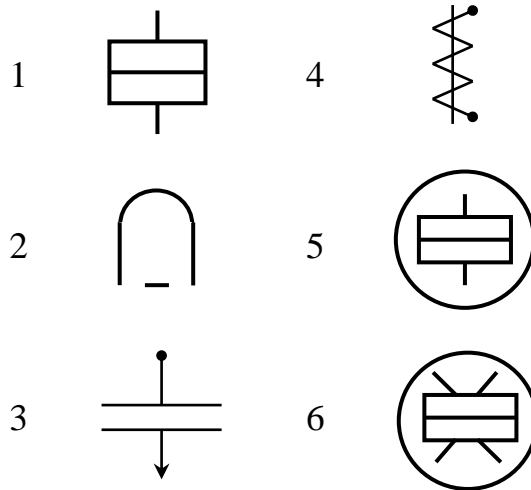
2. Складіть логічні пари. Якими літерами позначаються тип, назва приладу та спосіб створення обертального моменту електромеханічного вимірювального приладу?

- | | |
|-------------------------------|-----|
| 1 магнітоелектричний | 5 И |
| 2 електромагнітний | 6 Д |
| 3 електро – та феродинамічний | 7 Э |
| 4 індукційний | 8 М |

3. Принцип дії вимірювального механізму приладу магнітоелектричної системи заснований ...

- 1 на взаємодії магнітного поля нерухомої котушки зі струмом з одним або декількома феромагнітними осердям
- 2 на взаємодії двох чи декількох заряджених провідників
- 3 на взаємодії магнітних полів рухомої та нерухомої котушок зі струмами
- 4 на взаємодії магнітного потоку постійного магніту та поля котушки зі струмом

4. Складіть логічні пари. Розшифруйте умовні позначення систем електромеханічних приладів.

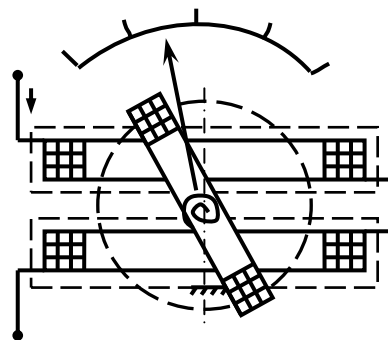


5. Принцип дії вимірювального механізму приладу електромагнітної системи заснований ...

- 1 на взаємодії двох чи декількох заряджених провідників
- 2 на взаємодії магнітного поля нерухомої котушки зі струмом з одним або декількома феромагнітними осердям
- 3 на взаємодії двох або декількох магнітних потоків з індукованими ними струмами в рухомій частині механізму
- 4 на взаємодії магнітного потоку постійного магніту та поля котушки зі струмом

6. Схема якого приладу наведена на рисунку?

- 1 схема магнітоелектричного логометра
- 2 схема приладу феродинамічної системи
- 3 схема електромагнітного логометра
- 4 схема приладу електромагнітної системи



7. Принцип дії вимірювального механізму приладу електродинамічної системи заснований ...

- 1 на взаємодії магнітних полів рухомої та нерухомої котушок зі струмами
- 2 на взаємодії магнітного поля нерухомої котушки зі струмом з одним або декількома феромагнітними осердям
- 3 на взаємодії магнітного потоку постійного магніту та поля котушки зі струмом
- 4 на взаємодії двох або декількох магнітних потоків з індукованими ними струмами в рухомій частині механізму

8. Яке призначення магнітопроводу в феродинамічному приладі?

1 для захисту вимірювального механізму від впливу зовнішніх електричних полів

2 для захисту вимірювального механізму від впливу зовнішніх магнітних полів та для збільшення моменту обертання рухомої частини та чутливості приладу

3 для захисту вимірювального механізму від впливу зовнішніх магнітних полів

4 для захисту вимірювального механізму від впливу електричних та магнітних полів

9. Взаємодія двох магнітних потоків з індукованими струмами в рухомій частині механізму є основою принципу дії вимірювального механізму приладу системи

1 магнітоелектричної

2 індукційної

3 феродинамічної

4 електростатичної

10. Яке призначення аретиру в електромеханічному приладі?

1 для забезпечення необхідного часу заспокоєння рухомої частини приладу

2 для візуального відліку значень вимірювальної фізичної величини

3 для нерухомого закріплення нерухомої частини приладу при його транспортуванні або монтажі

4 для встановлення покажчика на нульове положення на шкалі приладу при його вимкненому стані

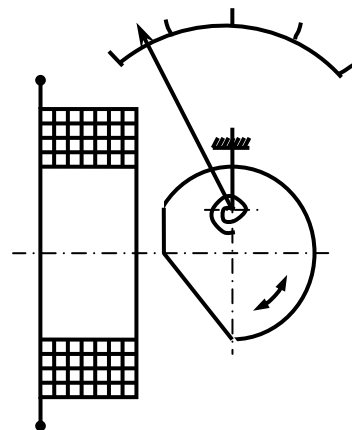
11. Схема якого приладу наведена на рисунку?

1 схема магнітоелектричного логометра

2 схема електромагнітного логометра

3 схема приладу електродинамічної системи

4 схема приладу електромагнітної системи



12. Який аналітичний вираз описує функцію перетворення магнітоелектричного приладу?

$$1 \quad \alpha = \frac{M_o}{W_{nm}} = S_I \cdot I$$

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

$$3 \quad \alpha = S \cdot I_{H.K} \cdot I_{P.K} \cdot \cos \psi$$

$$4 \quad \alpha = \frac{1}{2W_{nm}} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 = S_U \cdot U^2$$

13. Який аналітичний вираз описує функцію перетворення електродинамічного приладу?

$$1 \quad \alpha = S \cdot I_{H.K} \cdot I_{P.K} \cdot \cos \psi \qquad 3 \quad \alpha = \frac{1}{2W_{nm}} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 = S_U \cdot U^2$$

$$2 \quad \alpha = \frac{1}{W_{nm}} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2 \qquad 4 \quad \alpha = \frac{M_o}{W_{nm}} = S_I \cdot I$$

РОЗДІЛ 9.

ВИМІРЮВАЛЬНІ МОСТИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ КОМПЕНСАТОРИ

9.1 Загальні положення

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 9.1.

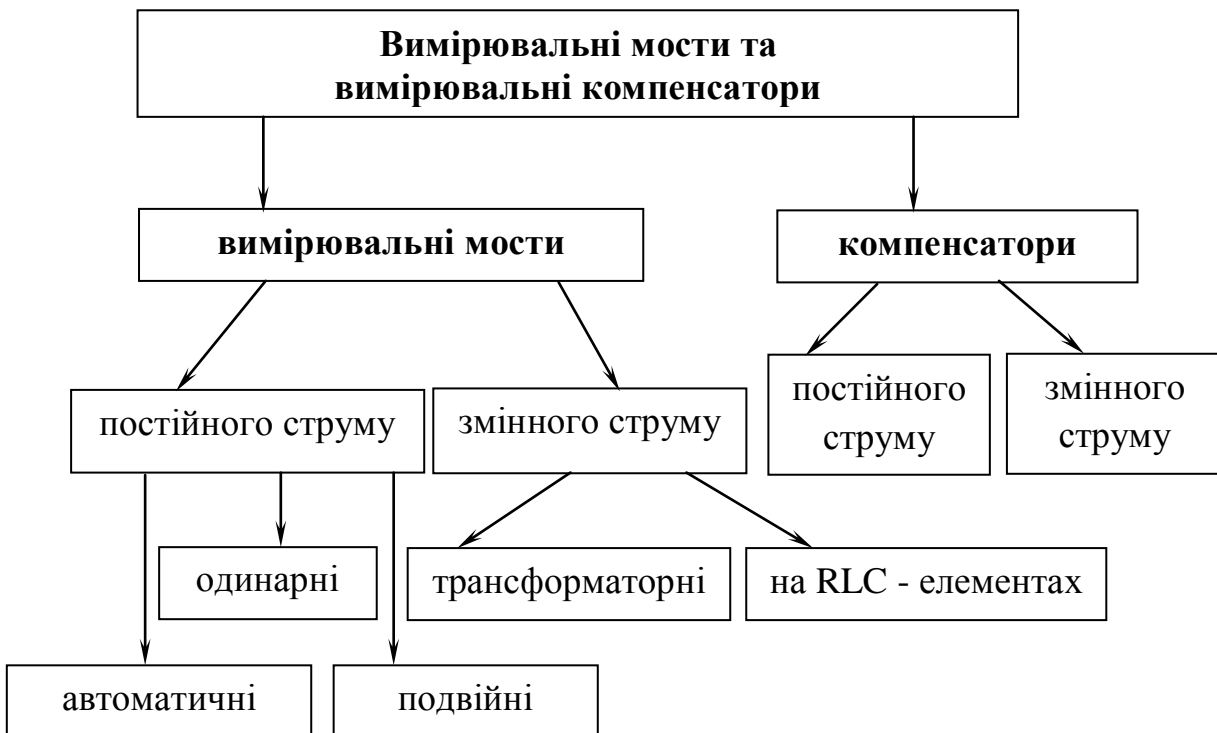


Рисунок 9.1 – Класифікація вимірювальних мостів та компенсаторів

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 9.2.

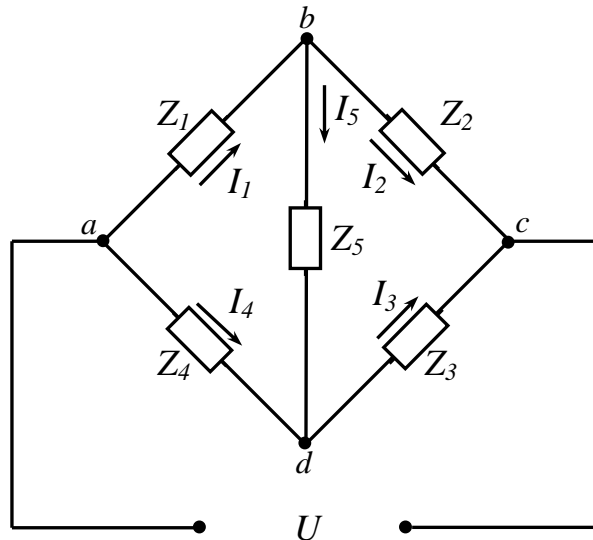


Рисунок 9.2 - Схема моста Уїтстона

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

$$I_1 \cdot Z_1 = I_4 \cdot Z_4. \quad (9.1)$$

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

$$I_2 \cdot Z_2 = I_3 \cdot Z_3 \quad (9.2)$$

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

Після проміжних математичних перетворень умова рівноваги має вигляд

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4. \quad (9.3)$$

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

$$\{ Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4; \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (9.4)$$

Рівняння системи (9.4) 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 почерговим 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

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4. \quad (9.5)$$

Порівнявши умови рівноваги (9.5) і (9.4) можна зробити висновок, що для зрівноваження мостів на змінному струмі необхідно досягти двох умов рівноваги (9.4), а на постійному – тільки одну (9.5). 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.

9.2 Вимірювальні мости постійного струму

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 9.3.

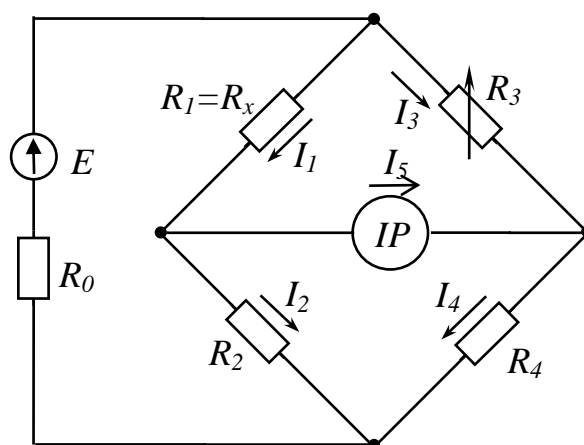


Рисунок 9.3 – Схема одинарного моста постійного струму

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 (9.5) 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 (IP).

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

$$R_x \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \quad (9.6)$$

звідки

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_4}, \quad (9.7)$$

де R_2, R_4 – плечі відношення;

R_3 – плече порівняння.

Із математичного виразу (9.7) 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. У широкодіапазонних одинарних мостах постійного струму плече порівняння виготовляють у вигляді важільного магазину опорів, який використовують для плавного ручного зрівноваження моста – рисунок 9.4.

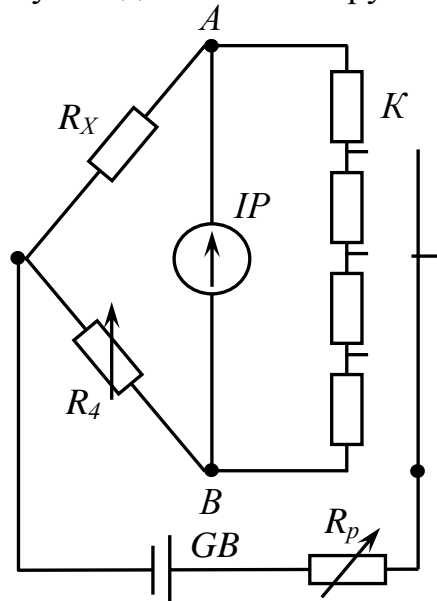


Рисунок 9.4 – Схема широкодіапазонного одинарного моста постійного струму

Сумарний опір плеча порівняння становить 10000 Ом , а дискретність – $0,1; 0,01; 0,001 \text{ Ом}$. Потрібне відношення R_2/R_4 встановлюють незалежною зміною кожного з них, якщо вони виконані у вигляді штепсельних магазинів опорів

або зміною відношення опорів цих плечей за незмінної суми опорів між точками А і В.

Тоді відношення R_2/R_4 подається у вигляді коефіцієнта K – рисунок 9.4, значення якого переважно дорівнює 0,01; 0,1; 1,0; 10 або 100.

Нижня границя вимірювання одинарних мостів за найпростішою двозатискачевою схемою увімкнення вимірюваного опору обмежується похибками, які вносять опори r_1 і r_2 з'єднувальних проводів і перехідних контактів, та переважно не нижча за 50 Ом.

При використанні чотиризатискачевої схеми увімкнення опорів – рисунок 9.5, розширюють нижню межу вимірювань одинарних мостів до 0,5...0,001 Ом.

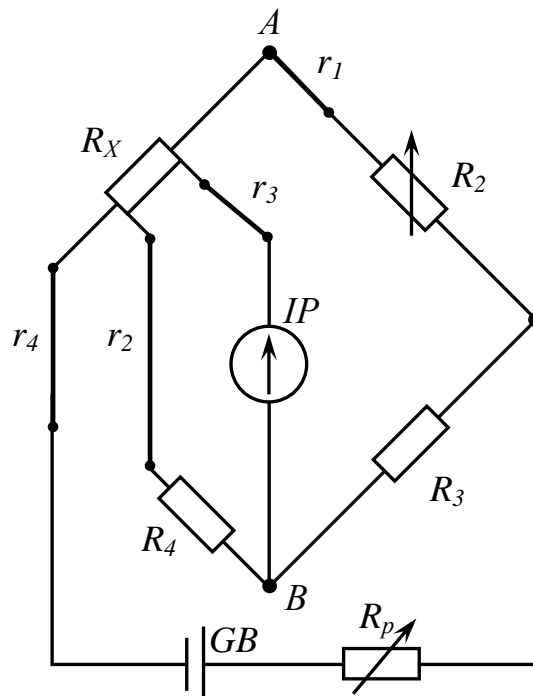


Рисунок 9.5 – Чотиризатискачева схема одинарного моста постійного струму

Так, в момент рівноваги опори з'єднувальних проводів r_3 і r_4 не впливають у цій схемі на результат вимірювань, так як вони увімкнені в діагоналях моста відповідно послідовно з джерелом живлення і показчиком рівноваги, а вплив опорів r_1 і r_2 істотно зменшується, так як вони додаються до плечей моста, які вибирають значно більшими від R_x . Щоб звести цей вплив до мінімального, в мостах опори плечей R_2 та R_4 зменшують заздалегідь на значення опору

r_k каліброваних з'єднувальних проводів, за допомогою яких вимірювані опори підключають до вимірювального моста.

В вимірювальних мостах передбачаються перемички або перемикачі, за допомогою яких можна здійснювати дво- або чотиризатискачеве приєднання вимірюваних опорів.

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 9.6.

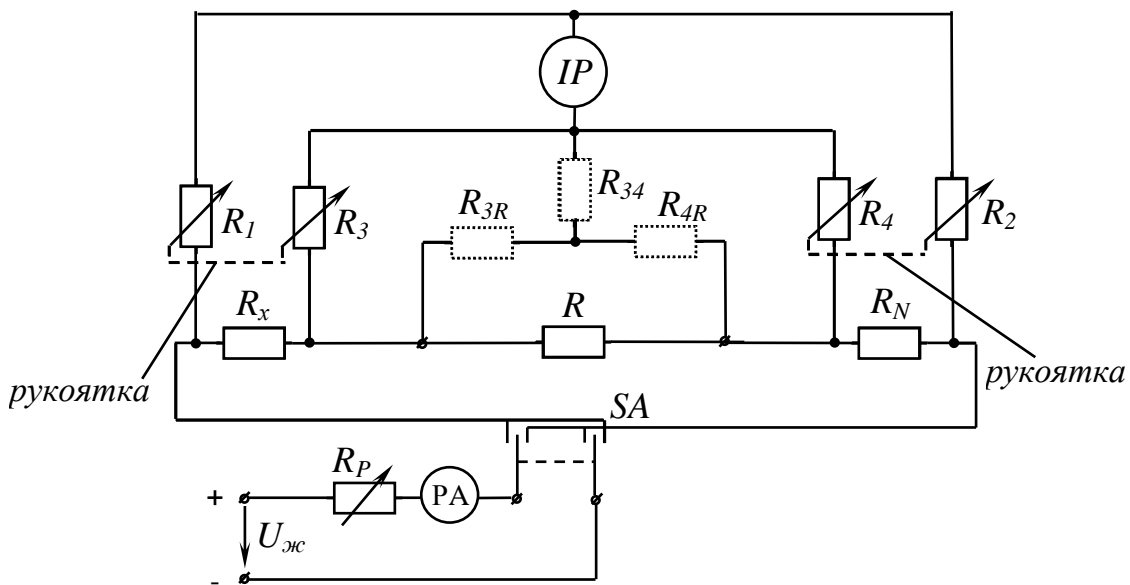


Рисунок 9.6 – Схема подвійного вимірювального моста постійного струму

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.

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

$$R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R}; \quad (9.8)$$

$$R_{3R} = \frac{R_3 \cdot R}{R_3 + R_4 + R}; \quad (9.9)$$

$$R_{4R} = \frac{R \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R}. \quad (9.10)$$

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

$$(R_x + R_{3R}) \cdot R_2 = R_1 \cdot (R_{4R} + R_N); \quad (9.11)$$

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot R_{4R} + R_1 \cdot R_N - R_2 \cdot R_{3R}. \quad (9.12)$$

Підставимо в вираз (9.11) формули (9.8)...(9.10) для опорів еквівалентної зірки

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 \cdot R}{R_3 + R_4 + R} + R_1 \cdot R_N - R_2 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 \cdot R}{R_3 + R_4 + R}. \quad (9.13)$$

звідки

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2} + \frac{R}{R_3 + R_4 + R} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot R_4}{R_2} - R_3 \right). \quad (9.14)$$

Аналіз виразу (9.14) 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

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (9.15)$$

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 .

Як було зазначено вище, 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} ... 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 ... 10^{-5} Ом клас точності 0,005...0,05, в діапазоні опорів 10^{-5} ... 10^{-8} Ом клас точності становить 0,1...5.

Зрівноваження мостів постійного струму можна автоматизувати. На рисунку 9.7 наведена схема автоматичного моста.

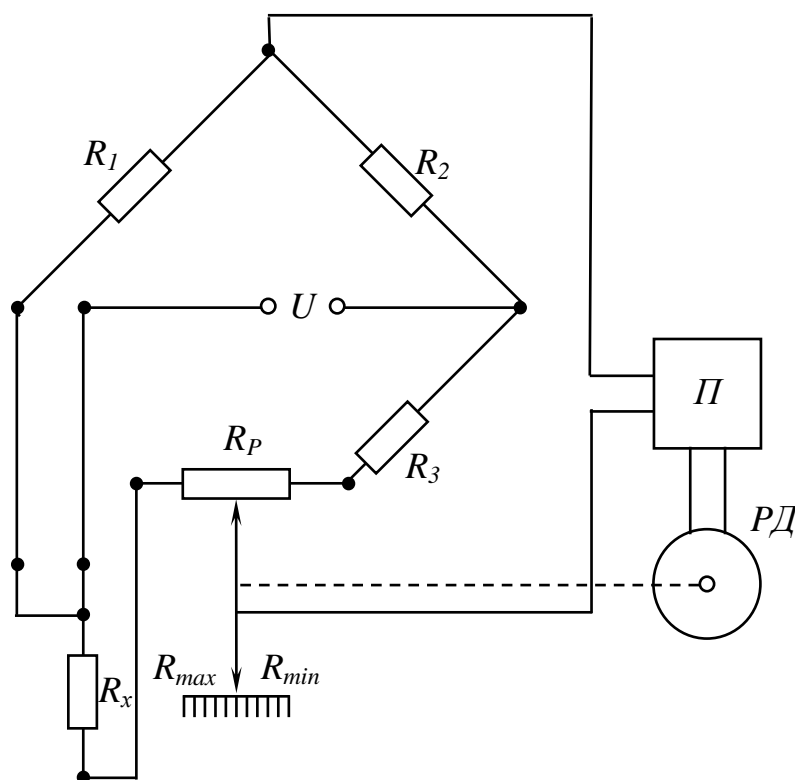


Рисунок 9.7 – Схема автоматичного вимірювального моста

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

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.

9.3 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 9.8.

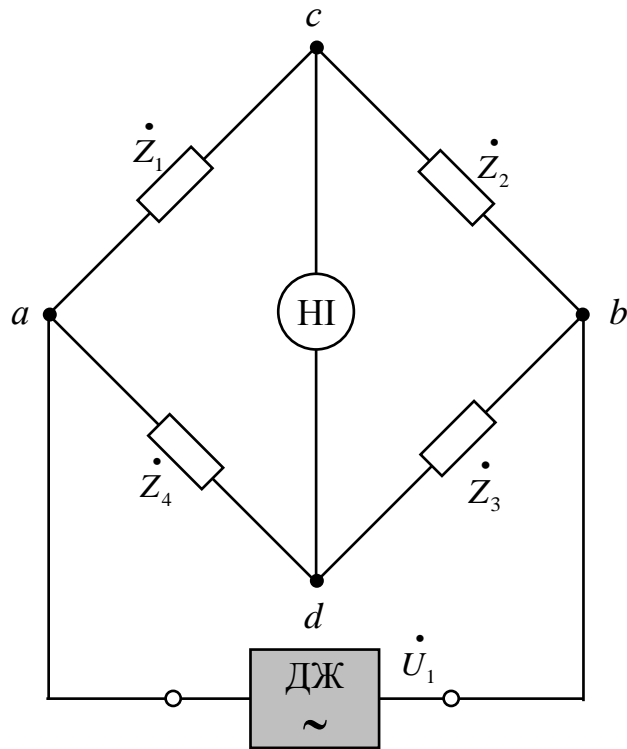


Рисунок 9.8 - Схема вимірювального моста змінного струму

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

$$\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_4, \tag{9.16}$$

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

Так як комплексний опір можна виразити як

$$\dot{Z} = Z e^{j\varphi}, \tag{9.17}$$

де Z – модуль комплексного опору;

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

Умову рівноваги моста (9.16) представимо у вигляді

$$Z_1 \cdot Z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_2 \cdot Z_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}. \tag{9.18}$$

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

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4; \quad (9.19)$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (9.20)$$

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 $\operatorname{tg}\delta_x$. На рисунку 9.9 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $\operatorname{tg}\delta_x$ з малими втратами ($\operatorname{tg}\delta_x = 10^{-5} \dots 10^{-2}$ град.).

Умова рівноваги такого моста має вигляд

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega \cdot C_x} \right) \cdot R_3 = \left(R_4 + \frac{1}{j\omega \cdot C_4} \right) \cdot R_2, \quad (9.21)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad \operatorname{tg}_x = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot R_4 \cdot C_4, \quad (9.22)$$

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

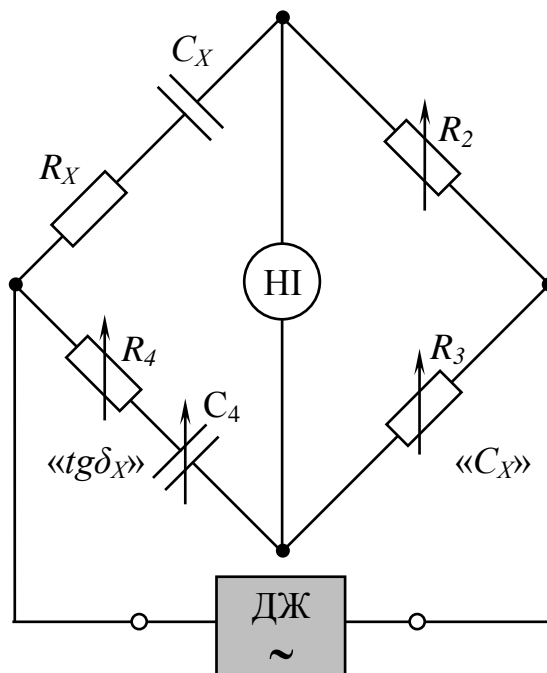


Рисунок 9.9 – Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з малими втратами

Аналіз виразу (9.22) 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 « $tg\delta_x$ », що забезпечує роздільний відлік вимірюваних величин. Зрівноваження схеми такого вимірювального моста здійснюють по чергові 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 9.10 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

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad tg_x = \frac{1}{\omega \cdot C_x \cdot R_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_4 \cdot R_4} \cdot (9.23)$$

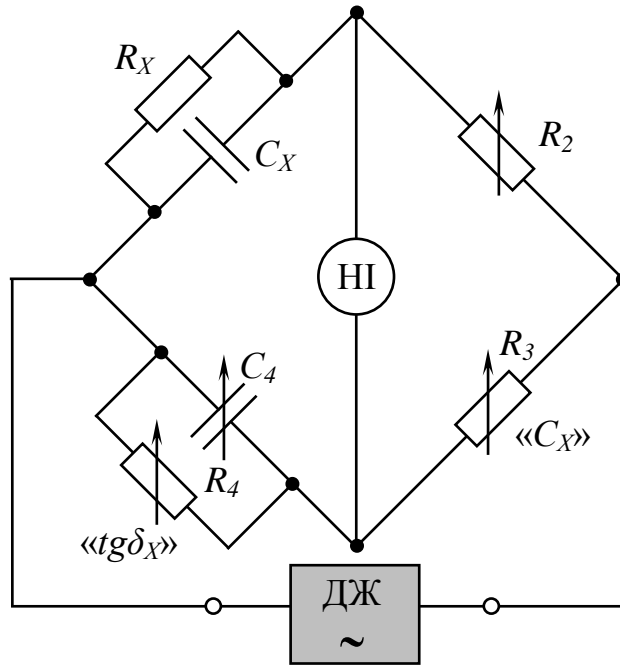


Рисунок 9.10 – Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з великими втратами

У такому разі схему моста зрівноважують по чергові зміню опорів плечей R_3 та R_4 , які відповідно проградуєвані в одиницях « C_x » і « tg_x », а розширення діапазону вимірювання – зміню 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 осердем. На рисунку 9.11 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

$$(R_x + j\omega \cdot L_x) \cdot \frac{R_3}{j\omega \cdot C_3} = R_2 \cdot R_4, \quad (9.24)$$

$$\left(R + \frac{1}{j\omega \cdot C_3} \right)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad (9.25)$$

$$Q_x = \frac{1}{tg\delta_x} = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \omega \cdot C_3 \cdot R_3. \quad (9.26)$$

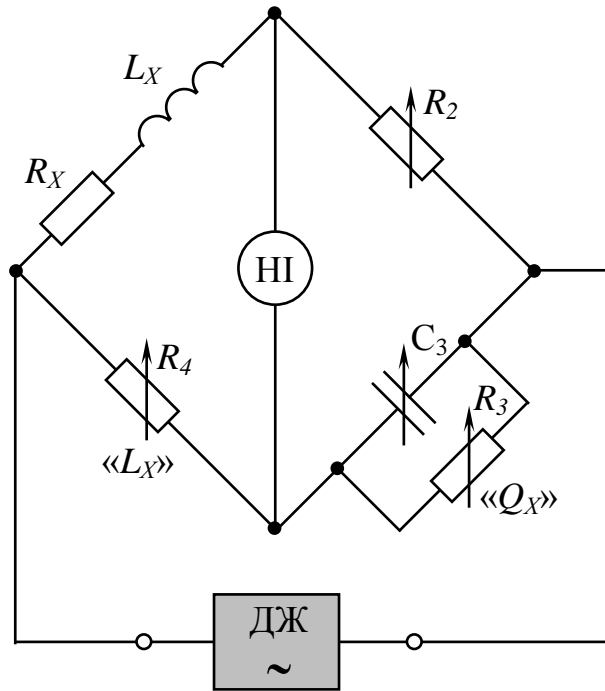


Рисунок 9.11 – Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя

Аналіз виразів (9.25) та (9.26) 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 – це 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 9.12, для якої справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad (9.27)$$

$$Q_x = \frac{R_x}{\omega \cdot L_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_3 \cdot R_3}. \quad (9.28)$$

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 $C_3 \cdot R_2 = N$.

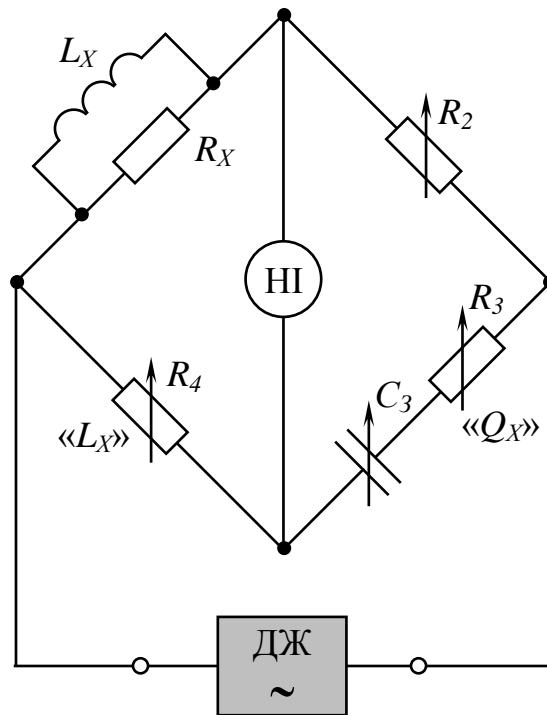


Рисунок 9.12 - Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок з феромагнітним осердям

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 кГц, а основна похибка вимірювання на частоті 1 кГц 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 9.13.а наведена автотрансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста. На рис. 9.13.б наведена трансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста.

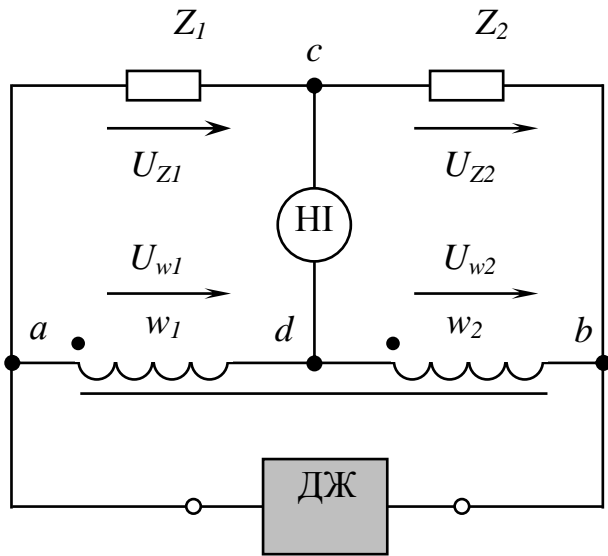


Рис. 9.13.а - Автотрансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста

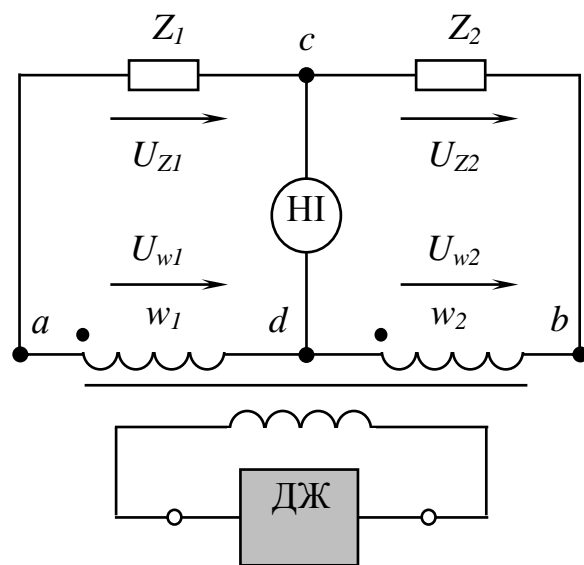


Рис. 9.13.б - Трансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста

Рівновага схем мостів, зображених на рисунку 9.13, 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

$$U_{w1} = U_{Z1}; U_{w2} = U_{Z2}. \quad (9.29)$$

Так як для елементів з тісним індуктивним зв'язком справедливе співвідношення

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (9.30)$$

тоді

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (9.31)$$

При підключенні у плече Z_1 вимірюваного комплексного опору Z_x , а у плече Z_2 – зразкового комплексного опору Z_N , тоді

$$Z_x = Z_N \cdot \frac{w_1}{w_2}. \quad (9.32)$$

Рівностями (9.31) та (9.32) 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 (9.31) 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.

9.4 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).

9.4.1 Компенсатори постійного струму

Принцип дії компенсатора напруги постійного струму – рисунок 9.14, полягає у тому, що вимірювана ЕРС, E_x , врівноважується відповідним спадом напруги $U_k = I_p \cdot R_{кx}$ на компенсаційному резисторі R_k 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 «X»), дорівнюватиме нулю. Тоді

$$E_x = U_{\kappa} = I_p \cdot R_{\kappa x}, \quad (9.33)$$

де $R_{\kappa x}$ – частина компенсаційного опору, з якого знімають компенсаційну напругу.

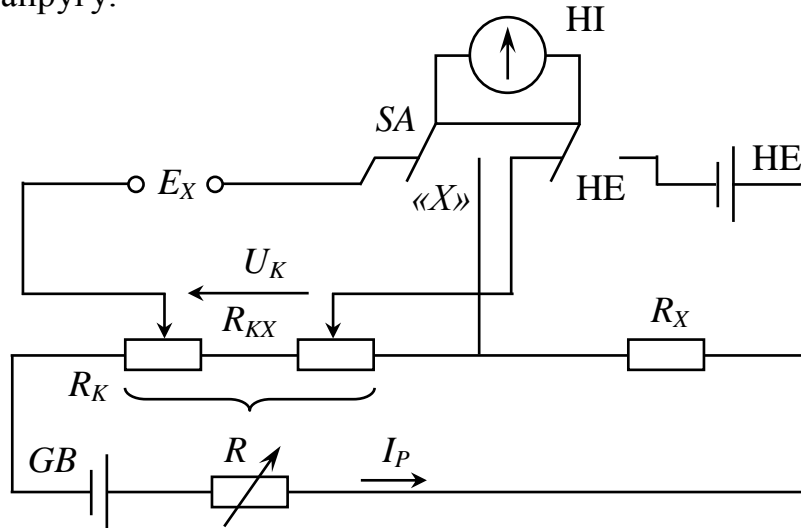


Рисунок 9.14 – Компенсатор постійного струму

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 регульовального резистора R досягають рівності напруги на опорі R_y та ЕРС нормального елемента (HE), E_N , про що свідчить нульовий показ нуля-індикатора. Тоді

$$I_p = \frac{E_N}{R_y}, \quad (9.34)$$

при цьому

$$E_x = U_{\kappa} = \frac{E_N}{R_y} \cdot R_{\kappa x} = E_N \cdot \frac{R_{\kappa x}}{R_y}. \quad (9.35)$$

Отже, вимірювання E_x зводиться до порівняння його значення зі значенням ЕРС нормального елемента в масштабі відношення $\frac{R_{\kappa x}}{R_y}$, а похибка вимі-

рювання E_x визначається сумою похибок ЕРС нормального елемента та похибкою відношення $\frac{R_{кх}}{R_y}$.

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.

9.4.2 Компенсатори змінного струму

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 частотнобііркові 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 9.15.

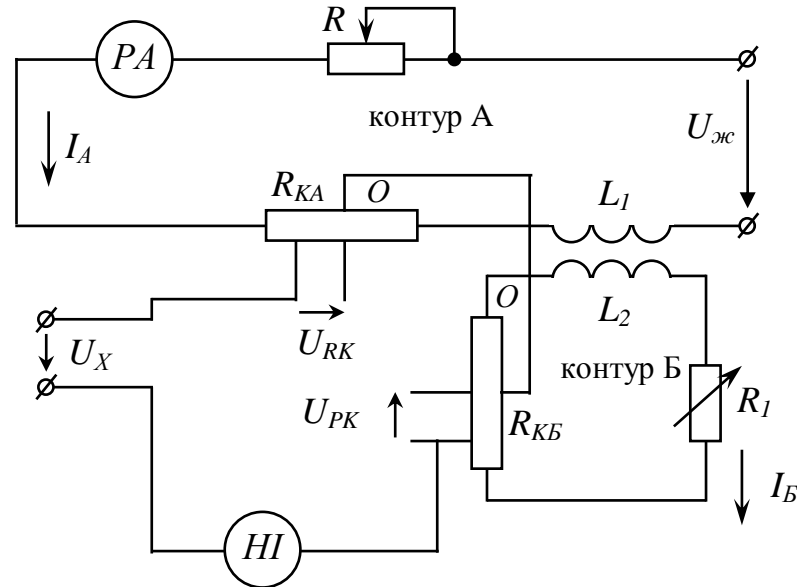


Рисунок 9.15 – Схема прямокутно-координатного компенсатора

Напруга $U_{кx}$ створюється робочим струмом $I_{рx}$, 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

$$|U_x| = U_{кx}; \quad |U_{xy}| = U_{кy}. \quad (9.36)$$

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 ДО РОЗДІЛУ 9

- 1 Наведіть основні поняття та означення для мостових засобів вимірювання.
- 2 За якими ознаками класифікують мостові засоби вимірювань?
- 3 Які особливості в зрівноваженні мостів постійного і змінного струму?
- 4 В зрівноваженій мостовій схемі змінного струму визначити R_x , L_x і Q_x , якщо $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $L_2 = 0,1 \text{ Гн}$, $R_3 = 20 \text{ Ом}$, $R_4 = 10 \text{ Ом}$. Наведіть структурну схему і виведіть умову рівноваги. Наведіть методику вимірювання.
- 5 Одинарний міст. Методика вимірювання активних опорів.
- 6 В зрівноваженій мостовій схемі змінного струму визначити R_x , L_x і Q_x , якщо $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 20 \text{ Ом}$, $C_3 = 0,1 \text{ мкФ}$, $R_4 = 20 \text{ Ом}$. Наведіть структурну схему і виведіть умову рівноваги. Наведіть методику вимірювання.
- 7 Подвійний міст. Схема, умова рівноваги, галузь застосування.
- 8 В зрівноваженій мостовій схемі змінного струму для вимірювання ємності з малими втратами визначити R_x , і C_x , якщо $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$, $R_3 = 100 \text{ Ом}$, $R_4 = 200 \text{ Ом}$. Наведіть структурну схему і виведіть умову рівноваги. Наведіть методику вимірювання.
- 9 Автоматичний міст постійного струму: структурна схема, принцип дії, галузь застосування.
- 10 В зрівноваженій мостовій схемі змінного струму для вимірювання ємності з великими втратами визначити R_x , і C_x , якщо $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$, $R_3 = 100 \text{ Ом}$, $R_4 = 200 \text{ Ом}$. Наведіть структурну схему і виведіть умову рівноваги. Наведіть методику вимірювання.
- 11 Наведіть принципову схему компенсатора постійного струму, поясніть принцип дії та наведіть основні метрологічні характеристики.

12 Наведіть принципову схему прямокутно-координатного компенсатора змінного струму, поясніть принцип дії та наведіть основні метрологічні характеристики.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 9

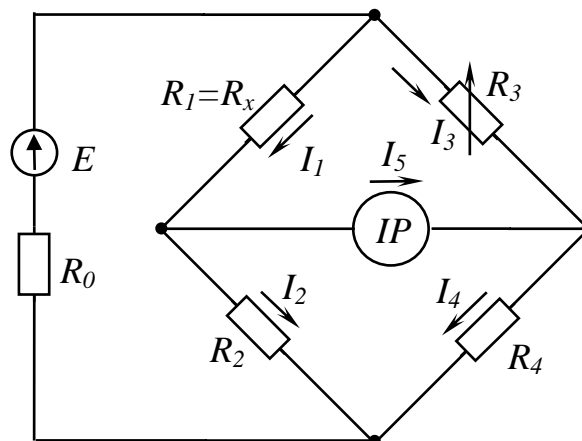
1. В конструкції якого засобу вимірювання покладене мостове вимірювальне коло?

- 1 вимірювального моста
- 2 вимірювального компенсатора
- 3 компаратора
- 4 вимірювального приладу

2. Чому вимірювальний міст постійного струму має назву одинарний?

- 1 так як складається з реохорду та чотирьох плечей моста
- 2 так як складається з чотирьох плечей моста
- 3 так як складається з шести плечей моста
- 4 так як складається з чотирьох плечей моста, з реохорду та підсилювача

3. Схема якого вимірювального моста наведена на рисунку?



- 1 одинарний вимірювальний міст постійного струму
- 2 автоматичний вимірювальний міст
- 3 компенсатор
- 4 подвійний вимірювальний міст

4. Яку назву мають резистори R_1 , R_2 , R_3 , R_4 в конструкції одинарного вимірювального моста постійного струму?

- 1 вимірювальна діагональ
- 2 плечі моста
- 3 вершини моста
- 4 діагональ моста

5. Плече вимірювального моста постійного струму – це ...

- 1 це електричне коло між двома вершинами моста, до якого включений резистор постійного струму
- 2 це електричне коло між двома протилежними вершинами моста, до якого включено джерело живлення постійного струму
- 3 це електричне коло між двома протилежними вершинами моста, до якого включений показчик рівноваги - електровимірювальний прилад з нульовою симетричною шкалою
- 4 це реохорд

6. Вершина вимірювального моста постійного струму – це ...

- 1 електричний вузол з'єднання двох протилежних плечей моста
- 2 електричний вузол з'єднання двох сусідніх плечей моста та один з проводів, що живить діагональ моста
- 3 електричний вузол з'єднання двох діагоналей моста
- 4 електричне коло між двома протилежними вершинами моста, до якого включений показчик рівноваги - електровимірювальний прилад з нульовою симетричною шкалою

7. Кількість операцій, які необхідні для досягнення рівноваги вимірювального моста з найменшим часом вимірювання має назву ...

- 1 зрівноваження вимірювального моста
- 2 збіжність вимірювального моста
- 3 не зрівноваження вимірювального моста
- 4 порівняння фізичної величини

8. Складіть умову рівноваги вимірювального моста, схема якого наведена в питанні 3, та оберіть вірний варіант відповіді

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 $R_1 \cdot R_2 = R_3 \cdot R_4$ | 3 $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ |
| 2 $Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$ | 4 $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ |

9. Оберіть три вірні відповіді. Які три додаткові пристрої необхідно застосувати, щоб вимірювальний міст з ручним врівноваженням став автоматичним?

- 1 реверсивний електродвигун
- 2 реохорд
- 3 показчик рівноваги
- 4 підсилювач
- 5 діагональ живлення

10. В якому приладі, принцип дії оснований на компенсації ЕРС або напруги?

- 1 в вимірювальному мості змінного струму
- 2 в автоматичному вимірювальному мості
- 3 в вимірювальному мості постійного струму
- 4 в вимірювальному компенсаторі

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Головка Д.Б. Основи метрології та вимірювань: підручник. / Д.Б.Головка, К.Г. Реґо, Ю.О.Скрипник. – К.: Либідь, 2001. – 408 с.
2. Гуржій А.М. Електричні і радіотехнічні вимірювання / А.М. Гуржій, Н.І. Поворознюк – К.: Нав. книга, 2002. – 287 с.
3. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 8.497-83. Государственная система обеспечения единства измерений. Амперметры, вольтметры, ваттметры, варметры. Методика поверки. – Введен в действие 01.01.1985. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1985. - Группа Т88.8.
4. Демидова-Панферова Р.М. Задачи и примеры расчетов по электроизмерительной технике / Р.М. Демидова-Панферова, В.Н. Малиновский, Ю.С.Солодов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 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. – Т.1: Основи метрології. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 532 с.
6. 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. – Т.2: Вимірювальна техніка. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 654 с.
7. ДСТУ 2708-99. Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення. - Чинний від 2000-07-01 // Кат. нормат. док. - К.: Держстандарт України, 2001. - Група 17.020
8. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. – Чинний від 1995-01-01 // Кат. нормат. док. - К.: Держстандарт України, 2001. - Група 01.040.17; 17.020 (Т 80).17.020.
9. Закон України про метрологію та метрологічну діяльність. – К.: №1314-VII-ВР, 05.06.2014 р.

10. Евтихийев Н.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин: учебн. пособие. / Н.Н.Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф.Папуловский, В.Н.Скугоров. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
11. Кухарчук В.В. Метрологія та вимірювальна техніка: навч. посібник. / В.В.Кухарчук, В.Ю.Кучерук, В.П.Долгополов, Л.В.Грумінська. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252 с.
12. 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.
13. Метрологія. Терміни та визначення: ДСТУ 2681-94. – [Чинний від 1995-01-01]. – К. Держстандарт України, 1994. – 68 с.
14. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення: ДСТУ 3651.0-97. - [Чинний від 1999-01-01]. – К. Держстандарт України, 1994. – 9 с.
15. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В.Новицкий, И.А.Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
16. 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.
17. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. / Л.А.Сена. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
18. Теория неопределенности в измерениях./И.П.Захаров, В.Д.Кукуш. – Харьков: Консум, 2002. – 256 с.
19. Шаповаленко О.Г. Основи електричних вимірювань. / О.Г.Шаповаленко, В.М.Бондар. – К.: Либідь, 2002. – 319 с.
20. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков: справочник. /Ю.Шульц. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.

21. Ціделко В.Д. Невизначенність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання: моногр. / В.Д.Ціделко, Н.А.Яремчук. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2002. – 176 с.

