

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

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

**МЕТОДИ І
ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ
ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА
НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН**

*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 621.317.3 (075)
ББК 31.221+31.102]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 Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Виданвичо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.

ISBN 978-617-7218-38-4

У навчальному посібнику розглянуто основні методи і засоби вимірювань електричних, магнітних і неелектричних величин та положення щодо оцінювання точності вимірювань. 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	7
ЧАСТИНА 1. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН	8
РОЗДІЛ 1 ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ І НАПРУГИ	8
1.1 Загальні положення	8
1.2 Вимірювання постійного струму	9
1.3 Вимірювання напруги у колах постійного струму	11
1.4 Вимірювання змінного струму і напруги	14
1.4.1 Загальні відомості	14
1.4.2 Вимірювання однофазного змінного струму	15
1.4.3 Вимірювання напруги однофазного змінного струму	18
1.5 Вимірювання змінного струму і напруги у трифазних колах	20
1.5.1 Загальні положення	20
1.5.2 Вимірювання струмів у трифазних колах	21
1.5.3 Вимірювання напруг у трифазних колах	25
<i>Контрольні запитання до розділу 1</i>	28
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 1</i>	28
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 1</i>	29
РОЗДІЛ 2 ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ	33
2.1 Загальні положення	33
2.2 Вимірювання активної потужності за допомогою амперметра і вольтметра	34
2.3 Вимірювання активної потужності за допомогою однофазних ват- метрів	37
2.3.1 Схеми увімкнення ватметрів до кіл	37
2.3.2 Розширення границь вимірювань ватметрів на змінному струмі при вимірюванні активної потужності	39
2.4 Вимірювання активної потужності у колах трифазного змінного струму	40
2.5 Вимірювання реактивної потужності у колах трифазного змінного струму	45

<i>Контрольні запитання до розділу 2</i>	50
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 2</i>	50
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 2</i>	51
РОЗДІЛ 3 ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	55
3.1 Загальні положення	55
3.2 Схеми увімкнення індукційних лічильників електричної енергії	55
3.3 Електронні лічильники електричної енергії	58
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 3</i>	58
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 3</i>	59
РОЗДІЛ 4 ВИМІРЮВАННЯ КУТА ЗСУВУ ФАЗ ТА КОЕФІЦІЄНТУ ПОТУЖНОСТІ	62
4.1 Загальні положення	62
4.2 Методи і засоби вимірювання кута зсуву фаз та коефіцієнта потужності	62
<i>Задачі для самостійного опрацювання до 4</i>	71
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 4</i>	73
РОЗДІЛ 5 ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ	74
5.1 Загальні положення	74
5.2 Методи і засоби вимірювання частоти	74
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 5</i>	81
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 5</i>	81
РОЗДІЛ 6 ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ В КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	83
6.1 Загальні положення про вимірювання електричного опору	83
6.2 Вимірювання електричного опору аналоговими омметрами	85
6.3 Вимірювання електричного опору цифровими омметрами	88
6.4 Вимірювання електричного опору методом амперметра і вольтметра	89
6.5 Мостовий метод вимірювання опору	91

6.6 Вимірювання електричного опору ізоляції	92
6.6.1 Особливості вимірювань великих опорів	92
6.6.2 Вимірювання опору ізоляції електричних пристроїв, які не знаходяться під робочою напругою	94
6.6.3 Вимірювання опору ізоляції електричних пристроїв, які знаходяться під робочою напругою	95
6.6.4 Визначення місця пошкодження ізоляції кабелю	97
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 6</i>	98
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 6</i>	99
РОЗДІЛ 7 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ	102
7.1 Загальні положення	102
7.2 Вимірювання параметрів елементів кіл змінного струму методом амперметра, вольтметра і ватметра	104
7.2.1 Вимірювання складових комплексного опору	104
7.2.2 Вимірювання взаємної індуктивності	106
7.3 Вимірювання параметрів елементів кіл змінного струму резонансним методом	109
7.4 Мостові методи вимірювань параметрів R , L , C	112
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 7</i>	116
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 7</i>	117
ЧАСТИНА 2. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН	121
РОЗДІЛ 8 ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ	121
8.1 Загальні положення	121
8.2 Параметричні вимірювальні перетворювачі	124
8.2.1 Резистивні перетворювачі	124
8.2.2 Ємнісні перетворювачі	132
8.2.3 Індуктивні перетворювачі	135
8.3 Генераторні вимірювальні перетворювачі	137
8.3.1 Індукційні перетворювачі	137

8.3.2 П'єзоелектричні перетворювачі	138
8.3.3 Трансформаторні перетворювачі	139
8.3.4 Магнітопружні перетворювачі	140
8.3.5 Електретні перетворювачі	141
8.3.6 Термоелектричні перетворювачі	142
8.3.7 Фотоелектричні перетворювачі	143
8.4 Методи та засоби вимірювання температури	144
8.5 Методи та засоби вимірювання механічних величин	159
8.6 Методи та засоби вимірювання рівня рідин	165
<i>Контрольні запитання до розділу 8</i>	170
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 8</i>	171
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 8</i>	172
ЧАСТИНА 3. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ	177
МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН	
РОЗДІЛ 9 ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН	177
ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ	
9.1 Загальні положення	177
9.2 Міри магнітних величин	179
9.2.1 Еталони та міри магнітної індукції (напруженості магнітного поля)	179
9.2.2 Еталони та міри магнітного потоку	180
9.2.3 Еталони та міри магнітного моменту	181
9.3 Вимірювальні перетворювачі магнітних величин	182
9.4 Вимірювання магнітного потоку	189
9.5 Вимірювання магнітної індукції та напруженості магнітного поля ..	193
9.6 Вимірювання феромагнітних втрат	195
<i>Контрольні запитання до розділу 9</i>	198
<i>Задачі для самостійного опрацювання до розділу 9</i>	198
<i>Тестові контрольні завдання для самоаналізу до розділу 9</i>	199
Список літератури	204

ПЕРЕДМОВА

Прискорений темп розвитку метрології, як науки про вимірювання та вимірювальну техніку, зумовив появу нових термінів та понять, а також нового світогляду до принципів вимірювань електричних, магнітних та неелектричних величин електричними методами.

Велика кількість різноманітних магнітних та неелектричних величин, можливість вимірювання їх електричними засобами вимірювань та можливість передачі вимірювальної інформації на відстань – все це надає зазначеним вимірюванням особливу роль в метрології та метрологічній діяльності.

Навчальний посібник націлений на формування у студентів базового комплексу знань про вимірювання фізичних величин та про вимірювальні перетворювачі магнітних та неелектричних величин в електричні. Посібник складений відповідно до програми навчальної дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології» і містить теоретичний матеріал, практичні приклади, тестові завдання для самоконтролю, задачі для самостійного розв'язку та список рекомендованої літератури. Рівень матеріалу ґрунтується на знаннях та вміннях з фізики, вищої математики, теоретичних основ електротехніки, з електроніки та мікросхемотехніки в обсязі навчальних програм названих дисциплін.

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. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

РОЗДІЛ 1.

ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

1.1 Загальні положення

Струм і напруга є найпоширенішими величинами, які необхідно вимірювати в широкому діапазоні. Діапазон вимірюваних струмів та напруг можна умовно поділити на піддіапазони: малі, середні та великі значення. Найкраще забезпечений засобами вимірювальної техніки діапазон середніх значень – для струму: від одиниць міліампер до десятків ампер; для напруги – від одиниць мілівольт до сотень вольт.

Засобами вимірювань постійного струму і напруги є амперметри (мікро-, мілі-, кілоамперметри) і вольтметри (мікро-, мілі-, кіловольтметри) різних систем, а також компенсатори постійного струму та компаратори напруг.

Для вимірювання постійного струму і напруги слід звертати увагу на такі умови:

- границя вимірювання приладу повинна більшою, ніж вимірювана величина або дорівнювати їй;
- власне споживання потужності приладу, яке визначається його внутрішнім опором, повинне бути мінімальним, а саме, опір амперметра повинен бути якомога меншим, а опір вольтметра – якомога більшим;
- клас точності приладу повинен бути таким, щоб гранична похибка його показу була меншою від допустимої похибки вимірювання, якщо вона задана, або була мінімальною, якщо допустима похибка не задана;
- стала приладу повинна бути мінімальною.

Для вимірювання дуже малих постійних струмів (від 10^{-25} А до 10^{-7} А) і напруг (від 10^{-5} В до 10 В) застосовують електрометри та електронні фотогальванометричні прилади.

Вимірюють великі постійні струми переважно магнітоелектричними та цифровими амперметрами із зовнішніми шунтами, а великі постійні напруги –

магнітоелектричними вольтметрами із зовнішніми додатковими резисторами, електростатичними і цифровими вольтметрами із подільниками напруги.

1.2 Вимірювання постійного струму

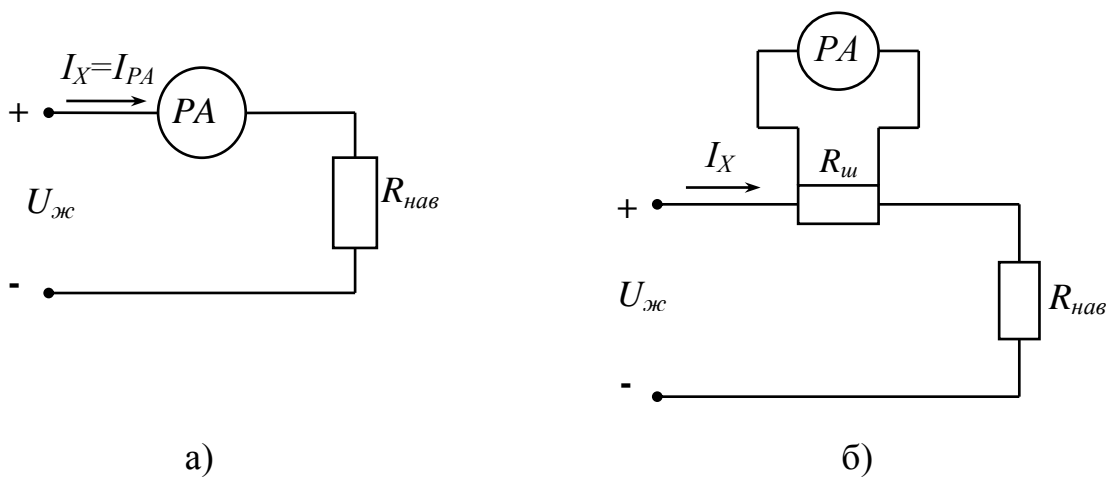
Найпоширенішими є *прямі вимірювання*, коли аналоговий чи цифровий амперметр вмикають послідовно із споживачем $R_{нав}$, струм I_X в якому необхідно виміряти, а результат вимірювань отримують безпосередньо за показами амперметра

$$I_X = I_{PA} = C_{PA} \cdot N_{PA}, \quad (1.1)$$

де C_{PA} – стала амперметра;

N_{PA} – положення покажчика на шкалі приладу.

На рисунку 1.1.а наведена схема прямого вимірювання постійного струму амперметром, а на рисунку 1.1.б – схема вимірювання постійного струму амперметром із зовнішнім шунтом.



а – пряме вимірювання постійного струму амперметром;

б - вимірювання постійного струму амперметром із зовнішнім шунтом

Рисунок 1.1 – Схема вимірювання постійного струму

Увімкнення в коло амперметра з певним внутрішнім опором R_{PA} змінює струм споживача до його увімкнення, тому через припущення, що $I_X = I_{PA}$ вини-

кає методична похибка вимірювання струму. Відносна методична похибка, яка зумовлена впливом внутрішнього опору амперметра на значення вимірюваного струму, дорівнює

$$\delta_{I..m} = \frac{\Delta_{I..m}}{I_X} \cdot 100\% = \frac{I_{PA} - I_X}{I_X} \cdot 100\% = -\frac{R_{PA}}{R_{PA} + R_{нав} + R_{ДЖ}} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

де $\Delta_{I..m}$ – абсолютна методична похибка;

$R_{ДЖ}$ – внутрішній опір джерела живлення.

Як видно з формули (1.2), для зменшення методичної похибки необхідно, щоб $R_{PA} \ll R_{нав}$, тому то слід використовувати амперметр з якомога меншим внутрішнім опором порівняно з опором об'єкта, струм в якому вимірюється.

Граничне значення основної відносної інструментальної похибки амперметра визначається за формулою

$$\delta_{PA.зр} = \pm \gamma_{PA} \cdot \frac{I_K}{I_{PA}} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

де $\Delta_{I..m}$ – граничне значення зведеної похибки амперметра – клас точності;

I_K – границя вимірювання амперметра.

Для розширення діапазону вимірювання амперметрів у бік великих струмів використовують шунти – рисунок 1.1.б.

Результат вимірювань у такому разі визначають безпосередньо за показами амперметра із зовнішнім шунтом $R_{ш}$

$$I_X = I_{PA} \cdot p = C_{PA} \cdot p \cdot N_{PA}, \quad (1.3)$$

де p – коефіцієнт шунтування.

Відносна методична похибка, яка зумовлена впливом внутрішнього опору амперметра із зовнішнім шунтом на значення вимірюваного струму, дорівнює

$$\delta_{I..m} = \frac{\Delta_{I..m}}{I_X} \cdot 100\% = -\frac{R_{PA}}{R_{ш} + R_{нав} + R_{ДЖ}} \cdot 100\%. \quad (1.4)$$

Приклад 1.1 Вибрати амперметр для прямого вимірювання струму, що протікає в колі споживача $R_{нав} = 500 \text{ Ом}$, який підключений до джерела живлення $E_{ДЖ} = 2,5 \text{ В}$ ($R_{ДЖ} \cong 0$). Допустиме значення відносної похибки $\delta_{дон} = \pm 0,75\%$.

Розв'язання 1. Обчислюємо орієнтовне значення струму I_X , що протікає у колі споживача $R_{нав}$

$$I_X = \frac{U_{ДЖ}}{R_{нав}} = \frac{2,5}{500} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

2. Обираємо магнітоелектричний міліамперметр типу М2015 класу точності 0,2 з границею вимірювання $I_K = 7,5 \text{ мА}$.

3. Розраховуємо граничні значення похибки вимірювання струму

$$\delta_{гр} = \pm \gamma_{РА} \cdot \frac{I_{К.РА}}{I_X} \cdot 100\% = \pm 0,2 \cdot \frac{7,5}{5,0} \cdot 100\% = \pm 0,39\%.$$

4. Висновок: Так як $\delta_{гр} < \delta_{дон}$, тому то міліамперметр вибрано вірно.

Для вимірювань постійних струмів призначені електронні та цифрові прилади. Важливими позитивними властивостями електронних приладів є їх широкий діапазон (від пікоампер до десятків ампер), мале споживання енергії від об'єкта дослідження і висока точність: клас точності електронних приладів 0,2, а цифрових 0,002. Перевагами цифрових приладів є висока швидкодія, автоматичний вибір діапазону вимірювань, визначення полярності вимірюваної величини, а також можливість передавання і реєстрації результатів вимірювань.

1.3 Вимірювання напруги у колах постійного струму

Найпоширенішими є *прямі вимірювання* напруги, коли аналоговий або цифровий вольтметр вмикають паралельно із споживачем $R_{нав}$ чи ділянкою кола, напругу U_X на якій необхідно виміряти.

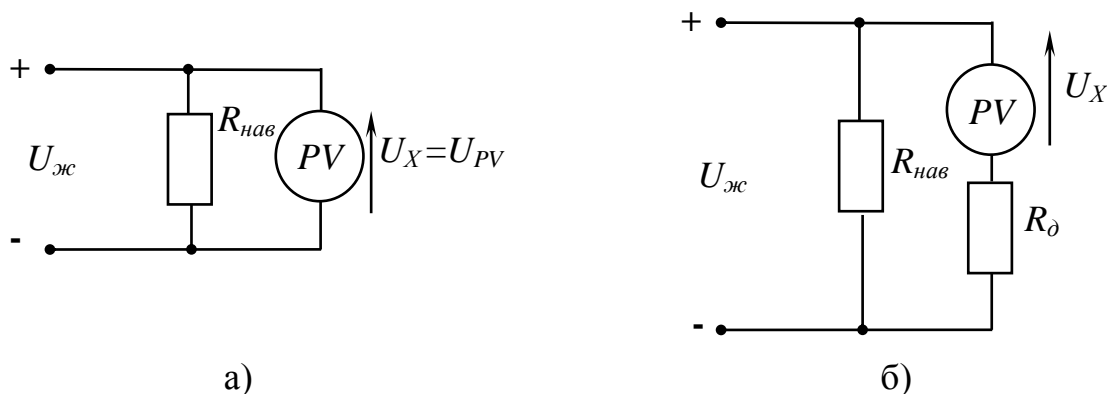
Результат вимірювань отримують безпосередньо за показами вольтметра

$$U_X = U_{PV} = C_{PV} \cdot N_{PV}, \quad (1.5)$$

де C_{PV} – стала вольтметра;

N_{PV} – положення покажчика на шкалі приладу.

На рисунку 1.2.а наведена схема прямого вимірювання напруги в колах постійного струму вольтметром, а на рисунку 1.2.б – схема вимірювання напруги в колах постійного струму вольтметром із додатковим резистором.



а – схема прямого вимірювання напруги вольтметром;

б - схема вимірювання напруги вольтметром із додатковим резистором

Рисунок 1.2 – Схема вимірювання напруги в колах постійного струму

Так як внутрішній опір вольтметра R_{PV} не є нескінченно великим, то при його вмиканні у вимірюване коло він шунтує ділянку кола і змінює його опір, при цьому виникає перерозподіл напруг на елементах кола, тому через припущення, що $U_X = U_{PV}$ виникає методична похибка вимірювання напруги.

Відносна методична похибка, яка зумовлена впливом внутрішнього опору вольтметра на значення вимірюваного струму, дорівнює

$$\delta_{U..m} = \frac{\Delta_{U..m}}{U_X} \cdot 100\% = \frac{U_{PV} - U_X}{U_X} \cdot 100\% = - \frac{R_{нав} / R_{PV}}{R_{нав} / R_{PV} + R_{нав} / R_{ДЖ} + 1} \cdot 100\%, \quad (1.6)$$

де $\Delta_{U..m}$ – абсолютна методична похибка.

Як видно з формули (1.6), для зменшення методичної похибки необхідно, щоб $R_{PV} \gg R_{нав}$, тому то необхідно використовувати вольтметр з якомога більшим внутрішнім опором порівняно з опором об'єкта, на якому вимірюється напруга.

Граничне значення основної відносної інструментальної похибки вольтметра визначається за формулою

$$\delta_{PV.зр} = \pm \gamma_{PV} \cdot \frac{U_K}{U_{PV}} \cdot 100\%, \quad (1.7)$$

де $\Delta_{U.м}$ – граничне значення зведеної похибки вольтметра – клас точності;

U_K – границя вимірювання вольтметра.

Для розширення діапазону вимірювання аналогових вольтметрів у бік великих напруг використовують додаткові резистори – рисунок 1.2.б, а цифрових вольтметрів – подільники напруги. Результат вимірювань у такому разі визначають безпосередньо за показами вольтметра із додатковим резистором R_δ

$$U_X = U_{PA} \cdot n = C_{PV} \cdot n \cdot N_{PV}, \quad (1.8)$$

де n – коефіцієнт розширення.

Відносна методична похибка, яка зумовлена впливом внутрішнього опору вольтметра із додатковим резистором на значення вимірюваної напруги, дорівнює

$$\delta_{U.м} = \frac{\Delta_{U.м}}{U_X} \cdot 100\% = - \frac{R_{наб} / (R_{PV} + R_\delta)}{R_{наб} / (R_{PV} + R_\delta) + R_{наб} / R_{ДЖ} + 1} \cdot 100\%. \quad (1.9)$$

Приклад 1.2 Визначити опір R_δ та вибрати додатковий резистор до вольтметра з границею вимірювання $U_K = 150 \text{ В}$, зі струмом повного відхилення $I_{PV} = 5 \text{ мА}$ і максимальним відліком шкали 150. Оператору необхідно виміряти напругу $U_X = 1200 \text{ В}$ та розрахувати границю вимірювання вольтметра з додатковим резистором та його нову сталу.

Розв'язання 1.Значення опору додаткового резистора R_δ визначаємо за формулою:

$$R_\delta = \frac{U_X - U_K}{I_{PV}} = \frac{1200 - 150}{5 \cdot 10^{-3}} = 210 \text{ кОм.}$$

2. Спадання напруги на додатковому резисторі визначаємо за формулою:

$$U_{R_\delta} = R_\delta \cdot I_{PV} = 210 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 1050 \text{ В.}$$

3. Стандартний додатковий резистор вибираємо за умов

$$U_{\partial.н} \geq U_{R_0}; \quad I_{\partial.н} = I_{PV}.$$

Виходячи з цих умов, вибираємо стандартний додатковий резистор типу P130M з $U_{\partial.н} = 1500 \text{ В}$ і номінальним струмом $I_{\partial.н} = 5 \text{ мА}$.

4. Границя вимірювання вольтметра з обраним додатковим резистором дорівнює

$$U_K + U_{\partial.н} = 150 + 1500 = 1650 \text{ В}.$$

5. Нова стала вольтметра з додатковим резистором дорівнює

$$C_{PV} = \frac{1650}{150} = 11 \text{ В / поділ}.$$

1.4 Вимірювання змінного струму і напруги

1.4.1 Загальні відомості

При вимірюванні змінних струмів і напруг вимірюваними величинами можуть бути їх миттєві, амплітудні, середні, середньовипрямлені та середньоквадратичні значення. У практиці електричних вимірювань найчастіше вимірюють параметри струмів і напруг синусоїдної форми, які переважно характеризують середньоквадратичним (діючим) значенням. Тому то переважну більшість засобів вимірювань змінних струмів і напруг градуують у середньоквадратичних діючих значеннях для синусоїдної форми кривої струму або напруги.

Робочими засобами вимірювань змінних струмів і напруг є амперметри (мікро-, мілі-, кілоамперметри) і вольтметри (мікро-, мілі-, кіловольтметри) різних систем, а також компенсатори змінного струму, компаратори напруг, реєструвальні прилади та електронні осцилографи.

Найпоширенішими є засоби вимірювань середньоквадратичних значень сигналів. Вимірюють середньоквадратичні значення (СКЗ) змінних струмів і напруг електродинамічними, електромагнітними, випрямними, аналоговими електронними і цифровими амперметрами і вольтметрами, а також електростатичними вольтметрами. Для вимірювань СКЗ малих змінних струмів ($I < 1 \text{ мА}$)

переважно застосовують цифрові, аналогові електронні і випрямні амперметри, а малих змінних напруг ($U < 10 \text{ мВ}$) – аналогові електронні вольтметри.

Найкращі метрологічні характеристики, а саме, найвищу точність і найменше власне споживання потужності, при вимірюванні СКЗ змінних струмів і напруг в діапазоні середніх значень (для струму – від одиниць міліампер до десятків ампер; для напруги – від десятків мілівольт до 1 кВ) мають цифрові та електродинамічні прилади.

Вимірюють великі змінні струми ($I > 30 \text{ А}$) і напруги ($U > 1000 \text{ В}$) переважно електродинамічними, електромагнітними приладами із зовнішніми вимірювальними трансформаторами струму і напруги. Прямі вимірювання великих змінних напруг (до 75 кВ) здійснюють електростатичними вольтметрами.

Миттєві значення змінних струмів і напруг вимірюють реєструвальними приладами, електронними та електромеханічними осцилографами.

Середнє значення та амплітудне значення вимірюють випрямними й електронними приладами.

1.4.2 Вимірювання однофазного змінного струму

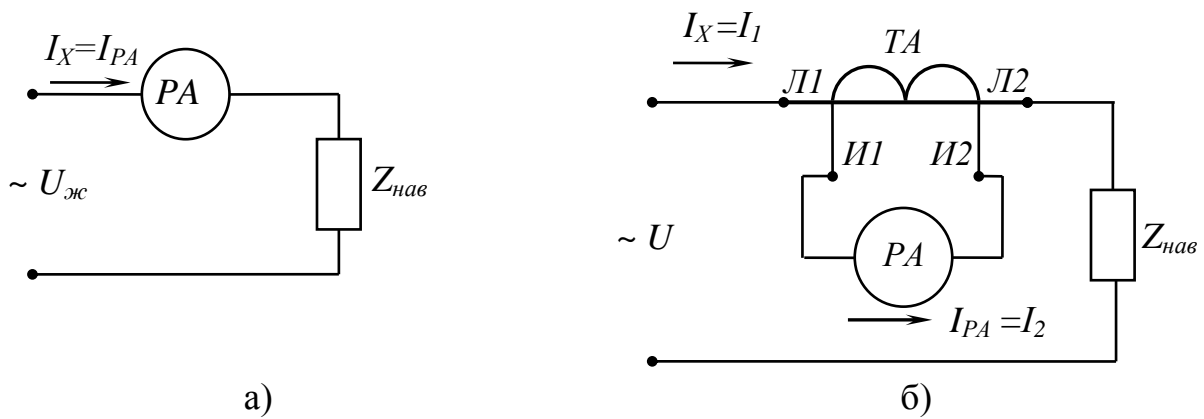
Як і при вимірюванні постійного струму, найпоширенішими є прямі вимірювання однофазного змінного струму, коли аналоговий чи цифровий амперметр вмикають послідовно із споживачем Z_H , струм I_X в якому необхідно виміряти – рисунок 1.3.а.

Результат вимірювання у такому разі, як і при вимірюванні постійного струму, визначають за формулою (1.1) відповідно до показу амперметра.

Аналогічно, як і у схемі на рисунку 1.1.а, увімкнення в коло споживача $Z_{нав}$ амперметра з певним внутрішнім опором R_{PA} змінює струм споживача до його увімкнення, що призводить до виникнення методичної похибки вимірювання струму, відносно значення якої дорівнює

$$\delta_{I.м} = \frac{\Delta_{I.м}}{I_X} \cdot 100\% = \frac{I_{PA} - I_X}{I_X} \cdot 100\% = -\frac{R_{PA}}{R_{PA} + Z_{нав} + R_{ДЖ}} \cdot 100\%, \quad (1.10)$$

де $Z_{нав}$ – модуль комплексного опору споживача, в якому вимірюють струм.



а) - схема прямого вимірювання амперметром;
 б) - схема вимірювання амперметром із
 вимірювальним трансформатором струму

Рисунок 1.3 – Схема вимірювання однофазного змінного струму

Як видно з формули (1.10), для зменшення методичної похибки необхідно, щоб $R_{PA} \ll Z_{нав}$, тому то слід використовувати амперметр з якомога меншим внутрішнім опором порівняно з опором об'єкта, струм в якому вимірюється.

Розширюють діапазон вимірювання амперметрів змінного струму за допомогою вимірювальних трансформаторів струму. Вимірювання здійснюється за схемою, яка наведена на рисунку 1.3.б. Споживач, струм I_X в якому необхідно виміряти, при цьому підключається послідовно з первиною обмоткою «Л1» - «Л2» трансформатора струму TA , а амперметр PA під'єднують до вторинної обмотки «И1» - «И2» трансформатора струму TA .

Значення вимірюваного струму I_X знаходять за формулою

$$I_X = I_{PA} \cdot k_{IH} = I_{PA} \cdot \frac{I_{1H}}{I_{2H}}, \quad (1.11)$$

де k_{IH} – номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму;

I_{1H} , I_{2H} – номінальні значення первинного та вторинного струмів вимірювального трансформатора струму відповідно.

Границю вимірювання амперметра I_K при вимірюванні струму I_X за схемою вибирають за умовою

$$I_K \geq I_{PA} = I_2, \quad (1.12)$$

при цьому

$$I_{PA} = I_2 = \frac{I_X}{k_{IH}}. \quad (1.13)$$

Приклад 1.3

Амперметр електродинамічної системи класу точності 0,2 з границею вимірювання $I_K = 5 \text{ A}$ і максимальним відліком $N_{max} = 100$ поділок увімкнений до однофазного кола змінного струму через вимірювальний трансформатор струму класу точності 0,1 з номінальним коефіцієнтом трансформації $k_{IH} = 25/5$.

Записати результат вимірювання струму у колі споживача $Z_{наб}$, якщо відлік на шкалі $N_{PA} = 75$ поділок, умови експерименту нормальні.

Розв'язання 1. Визначаємо показання амперметра за формулою

$$I_{PA} = C_{PA} \cdot N_{PA} = \frac{I_K}{N_{max}} \cdot N_{PA} = \frac{5}{100} \cdot 75 = 3,75 \text{ A}.$$

2. Визначаємо значення вимірюваного струму за формулою:

$$I_X = I_{PA} \cdot k_{IH} = 3,75 \cdot 25/5 = 18,75 \text{ A}.$$

3. Так як умови експерименту нормальні, то похибка вимірювання струму за схемою (див. рисунок 1.3.б) буде визначатися тільки основними похибками амперметра та вимірювального трансформатора струму за формулою

$$\delta_{I.зр} = \pm(\delta_{PA.зр} + f_{I.зр}),$$

де $\delta_{PA.зр}$ – основна відносна похибка показу амперметра;

$f_{I.зр}$ – струмова похибка трансформатора струму, яка дорівнює

його класу точності; $f_{I.зр} = 0,1$;

$$\delta_{PA.зр} = \pm \gamma_{PA.зр} \cdot \frac{I_K}{I_{PA}} \cdot 100\% = \pm 0,2 \cdot \frac{5}{3,75} \cdot 100\% = \pm 0,266\%;$$

$$\delta_{I.зр} = \pm(0,266 + 0,1) = \pm 0,366\%.$$

4. Обчислюємо граничне значення абсолютної похибки вимірювання струму

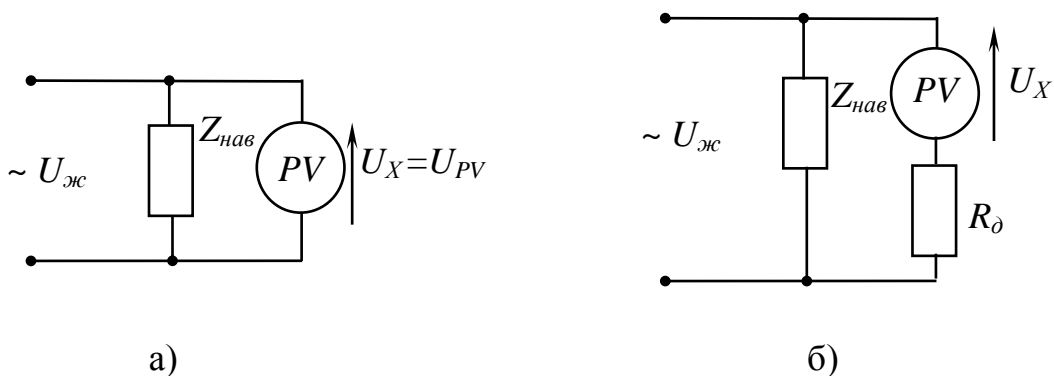
$$\Delta I_{ep} = \pm \frac{\delta_{I.ep} \cdot I_X}{100\%} = \pm \frac{0,366 \cdot 18,75}{100\%} = \pm 0,0686 A.$$

5. Результат вимірювання струму записуємо у формі відповідно до правил заокруглення

$$I_X = (18,75 \pm 0,07), A.$$

1.4.3 Вимірювання напруги однофазного змінного струму

Як і при вимірюванні напруги постійного струму, найпоширенішими є прямі вимірювання напруги однофазного змінного струму, коли аналоговий чи цифровий вольтметр вмикають паралельно із споживачем Z_H чи ділянкою кола, напругу U_X на якому необхідно виміряти – рисунок 1.4.а.



а - схема прямого вимірювання напруги;

б - схема вимірювання напруги вольтметром із додатковим резистором

Рисунок 1.4 - Схема вимірювання напруги в однофазному колі змінного струму

Аналогічно, як і в схемі на рисунку 1.2.а, увімкнення паралельно до споживача $Z_{нає}$ вольтметра з внутрішнім опором R_{PV} змінює спад напруги U_X на ньому, що призводить до виникнення методичної похибки вимірювання напруги, відносне значення якої $\delta_{U.m}$, дорівнює

$$\delta_{U.m} = - \frac{Z_{нає} / R_{PV}}{Z_{нає} / R_{PV} + Z_{нає} / R_{ДК} + 1} \cdot 100\%, \quad (1.14)$$

де $Z_{нає}$ – модуль комплексного опору споживача, спад напруги на якому вимірюють.

Як видно з формули (1.14) для зменшення методичної похибки необхідно використовувати вольтметр з якомога більшим внутрішнім опором порівняно з опором об'єкта, на якому вимірюється напруга, так як $R_{PV} \gg Z_{нав}$.

Схема вимірювання напруги змінного струму вольтметром із зовнішнім додатковим резистором наведена на рисунку 1.4.б. Вибір додаткового резистора і визначення результату вимірювання здійснюється аналогічно, як під час вимірювання напруги у колах постійного струму (див. п. 1.3). Зовнішні додаткові резистори у вимірювальній практиці застосовуються рідко, оскільки сучасні аналогові і цифрові вольтметри змінного струму мають границі вимірювання від 600 В до 1000 В, що перекриває діапазон напруг під час масових технічних вимірювань.

В електроенергетиці здійснюються вимірювання напруги при вищих напругах ($U > 1000 В$), тому то для розширення діапазону вимірювання вольтметрів змінного струму використовують вимірювальні трансформатори напруги TV – рисунок 1.5.

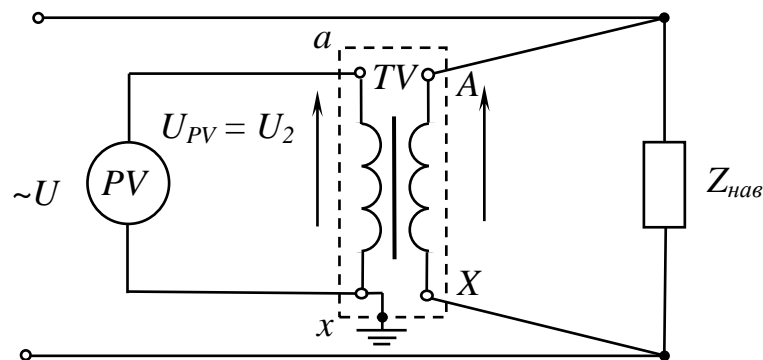


Рисунок 1.5 – Схема вимірювання напруги в однофазному колі змінного струму вольтметром із вимірювальним трансформатором напруги

До споживача $Z_{нав}$, спад напруги U_X , на якому необхідно виміряти, паралельно підключається первинна обмотка «А» - «Х» вимірювального трансформатора напруги TV, а вольтметр під'єднують до вторинної обмотки «а» - «х» трансформатора. Корпус та затискач «х» вторинної обмотки заземлюють.

Значення вимірюваної напруги U_X знаходять за формулою

$$U_X = U_{PV} \cdot k_{UH} = U_{PV} \cdot \frac{U_{1H}}{U_{2H}}, \quad (1.15)$$

де k_{UH} – номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги;

U_{1H} , U_{2H} – номінальні значення первинної та вторинної напруги вимірювального трансформатора напруги відповідно.

Границю вимірювання вольтметра U_K при вимірюванні напруги U_X за схемою (див. рисунок 1.5) вибирають за умовою

$$U_K \geq U_{PV} = U_2, \quad (1.16)$$

при цьому

$$U_{PV} = U_2 = \frac{U_X}{k_{UH}}. \quad (1.17)$$

На похибку вимірювання напруги впливає похибка трансформатора напруги, тому то його клас точності повинен бути вищим, ніж клас точності вольтметра.

1.5 Вимірювання змінного струму і напруги у трифазних колах

1.5.1 Загальні положення

Вимірювання струмів і напруг у трифазних колах має особливості.

У несиметричних трифазних колах кожен вимірювану величину – фазні I_ϕ або лінійні I_L струми та фазні U_ϕ та лінійні U_L напруги можна вимірювати відповідним амперметром або вольтметром. Тому кількість необхідних засобів вимірювань дорівнює кількості вимірюваних величин. Але виходячи із аналізу кожного конкретного трифазного кола, кількість засобів вимірювань можна зменшити.

При вимірюваннях у симетричних трифазних колах достатньо виміряти струм чи напругу тільки в одній фазі (лінії), так як всі лінійні (фазні) струми та напруги рівні. Взаємозв'язок між лінійними і фазними струмами та напругами, а також кількість засобів вимірювань залежить від схеми увімкнення трифазних

споживачів – «зірка» чи «трикутник». У симетричних трифазних колах цей взаємозв'язок визначається співвідношеннями:

- при увімкненні споживачів за схемою «зірка»

$$I_L = I_\phi; \text{ та } U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi; \quad (1.18)$$

- при увімкненні споживачів за схемою «трикутник»

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi; \text{ та } U_L = U_\phi. \quad (1.19)$$

1.5.2 Вимірювання струмів у трифазних колах

Згідно співвідношення (1.18) для вимірювання лінійних (фазних) струмів у симетричних трифазних колах при увімкненні споживачів за схемою «зірка» достатньо використати один амперметр PA – рисунок 1.6.

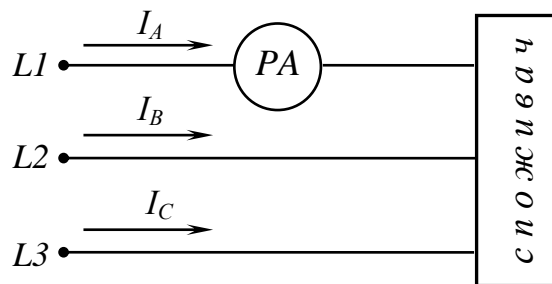


Рисунок 1.6 – Схема вимірювання лінійних (фазних) струмів одним амперметром у симетричному трифазному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка»

Значення вимірюваних лінійних (фазних) струмів визначаються за формулою

$$I_A = I_B = I_C = I_{PA}. \quad (1.20)$$

Згідно співвідношення (1.19) у симетричних трифазних колах при увімкненні споживачів за схемою «трикутник» для вимірювання фазних струмів використовується один амперметр PA_ϕ , а для вимірювання лінійних струмів також достатньо застосувати один амперметр PA_L – рисунок 1.7.

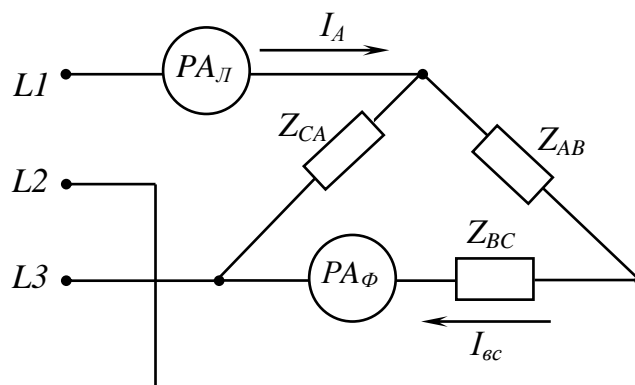


Рисунок 1.7 – Схема вимірювання лінійних та фазних струмів у симетричному трифазному колі при увімкненні споживачів за схемою «трикутник»

Значення вимірюваних лінійних струмів визначаються за формулою

$$I_A = I_B = I_C = I_{PAЛ}. \quad (1.21)$$

Значення вимірюваних фазних струмів визначаються за формулою

$$I_{ав} = I_{вс} = I_{са} = I_{PAФ}. \quad (1.22)$$

У несиметричних трифазних колах при вимірюванні лінійних (фазних) струмів при увімкненні споживачів за схемою «зірка» використовуються три амперметри $PA1 \dots PA3$ – рисунок 1.8.

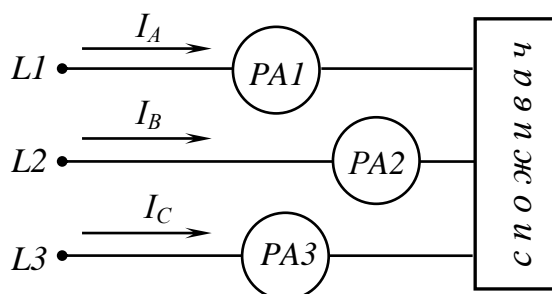


Рисунок 1.8 – Схема вимірювання лінійних (фазних) струмів трьома амперметрами у несиметричному трифазному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка»

Значення вимірюваних лінійних (фазних) струмів визначаються за формулами

$$I_A = I_{PA1}; \quad I_B = I_{PA2}; \quad I_C = I_{PA3}. \quad (1.23)$$

У несиметричних трифазних трипровідних колах при вимірюванні струмів із застосуванням вимірювальних трансформаторів струму застосовується схема з трьома амперметрами та двома трансформаторами струму – рисунок 1.9.

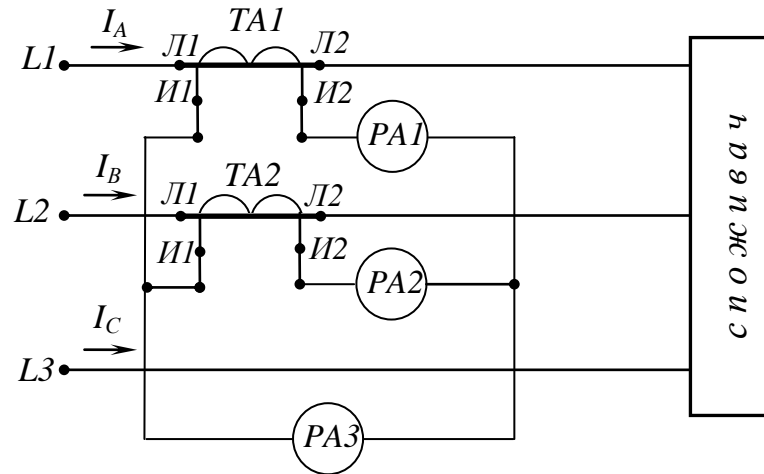


Рисунок 1.9 - Схема вимірювання струмів з трьома амперметрами та двома трансформаторами струму у несиметричних трифазних трипровідних колах

Так як номінальні коефіцієнти трансформації k_{IH} вимірювальних трансформаторів струму $TA1$, $TA2$ однакові, тому то покази I_{PA1} та I_{PA2} амперметрів $PA1$ та $PA2$ будуть пропорційні до діючих значень лінійних струмів I_A та I_B , які дорівнюють

$$I_A = I_{PA1} \cdot k_{IH}; \quad I_B = I_{PA2} \cdot k_{IH}. \quad (1.24)$$

Амперметр $PA3$ ввімкнений так, що його показ I_{PA3} дорівнює сумі показів амперметрів $PA1$ та $PA2$, тобто $I_{PA3} = I_{PA1} + I_{PA2}$, та з урахуванням виразів (1.24) пропорційний до діючого значення лінійного струму I_C , який визначається за формулою

$$I_C = I_A + I_B = I_{PA3} \cdot k_{IH}. \quad (1.25)$$

У несиметричних трифазних чотирипровідних колах при вимірюванні струмів із застосуванням вимірювальних трансформаторів струму застосову-

ється схема з чотирма амперметрами та трьома трансформаторами струму – рисунок 1.10.

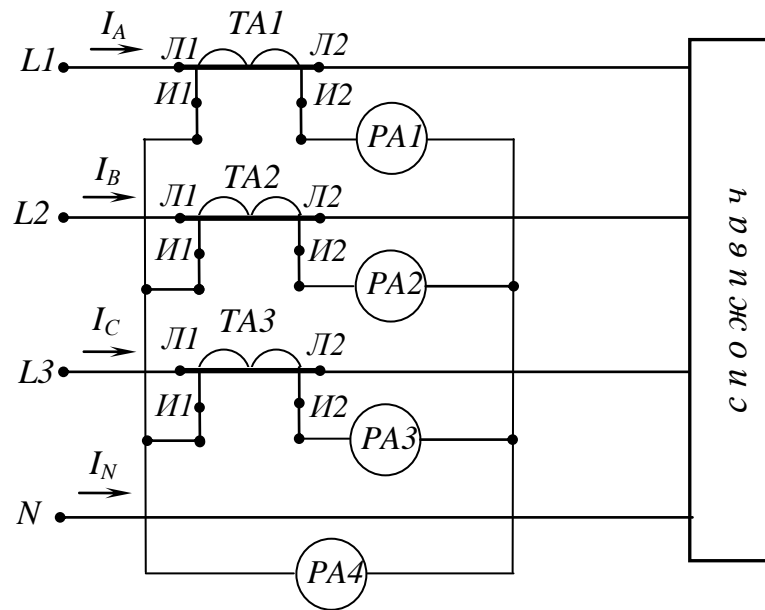


Рисунок 1.10 - Схема вимірювання струмів з чотирма амперметрами та трьома трансформаторами струму у несиметричних трифазних чотирипровідних колах

Так як номінальні коефіцієнти трансформації k_{IH} вимірювальних трансформаторів струму $TA1...TA3$ однакові, тому то покази $I_{PA1}...I_{PA3}$ амперметрів $PA1...PA3$ будуть пропорційні до діючих значень лінійних струмів I_A, I_B, I_C , які дорівнюють

$$I_A = I_{PA1} \cdot k_{IH}; \quad I_B = I_{PA2} \cdot k_{IH}; \quad I_C = I_{PA3} \cdot k_{IH}. \quad (1.26)$$

Амперметр $PA4$ ввімкнений так, що його показ I_{PA4} дорівнює сумі показів амперметрів $PA1...PA3$, тобто $I_{PA4} = I_{PA1} + I_{PA2} + I_{PA3}$, та з урахуванням виразів (1.26) пропорційний до діючого значення струму I_N , який визначається за формулою

$$I_N = I_A + I_B + I_C = I_{PA4} \cdot k_{IH}. \quad (1.27)$$

1.5.3 Вимірювання напруг у трифазних колах

Згідно співвідношення (1.18) у симетричному трифазному трипровідному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка» для вимірювання лінійних напруг використовується один вольтметр PV_L , а для вимірювання фазних напруг також достатньо застосувати один вольтметр PV_ϕ – рисунок 1.11.

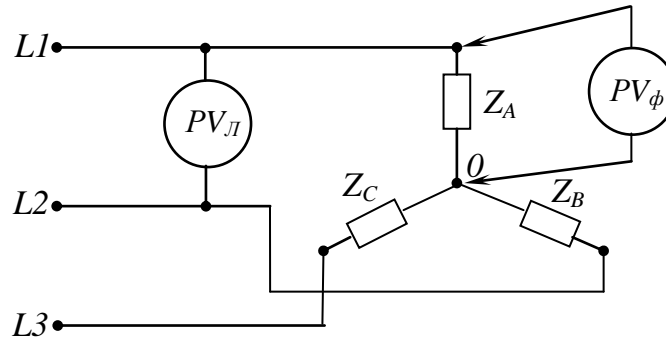


Рисунок 1.11 – Схема вимірювання лінійних та фазних напруг у симетричному трифазному трипровідному колі змінного струму при увімкненні споживачів за схемою «зірка»

Значення вимірюваних лінійних напруг визначаються за формулою

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{PV_L}. \quad (1.28)$$

Значення вимірюваних фазних напруг визначаються за формулою

$$U_A = U_B = U_C = U_{PV_\phi}. \quad (1.29)$$

У симетричному трифазному чотирьохпровідному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка» для вимірювання лінійних напруг використовується один вольтметр PV_L , а для вимірювання фазних напруг також достатньо застосувати один вольтметр PV_ϕ – рисунок 1.12.

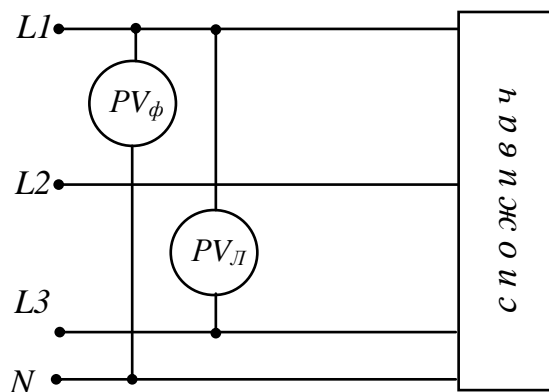


Рисунок 1.12 – Схема вимірювання лінійних та фазних напруг у симетричному трифазному чотирипровідному колі змінного струму

Значення вимірюваних лінійних напруг визначаються за формулою (1.28), а значення вимірюваних фазних напруг визначаються за формулою (1.29).

Згідно співвідношення (1.19) у симетричних трифазних колах при увімкненні споживачів за схемою «трикутник» для вимірювання лінійних (фазних) напруг використовується один вольтметр PV – рисунок 1.13.

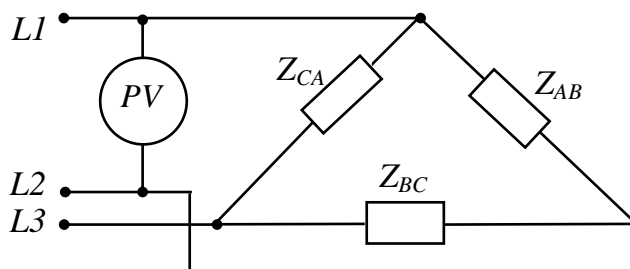


Рисунок 1.13 - Схема вимірювання лінійних (фазних) напруг у симетричному трифазному трипровідному колі змінного струму при увімкненні споживачів за схемою «трикутник»

Значення вимірюваних лінійних (фазних) напруг визначаються за формулою

$$U_A = U_B = U_C = U_{PV}. \quad (1.30)$$

У несиметричних трифазних трипровідних колах при вимірюванні лінійних напруг використовуються три вольтметри – рисунок 1.14.

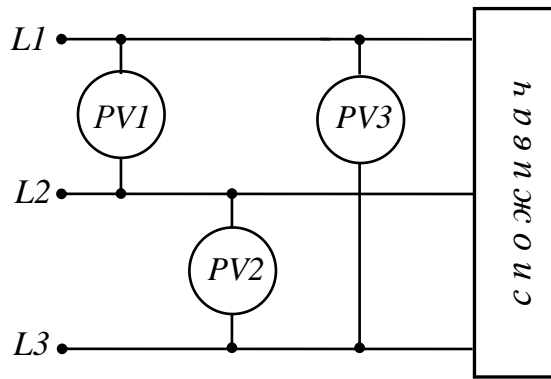


Рисунок 1.14 - Схема вимірювання лінійних напруг у несиметричному трифазному трипровідному колі змінного струму

Значення вимірюваних лінійних (фазних) напруг визначаються за формулою

$$U_{AB} = U_{PV1}; \quad U_{BC} = U_{PV2}; \quad U_{CA} = U_{PV3}. \quad (1.31)$$

У несиметричних трифазних трипровідних колах при вимірюванні фазних напруг із застосуванням вимірювальних трансформаторів напруги використовується схема з трьома вольтметрами та двома вимірювальними трансформаторами напруги – рисунок 1.15.

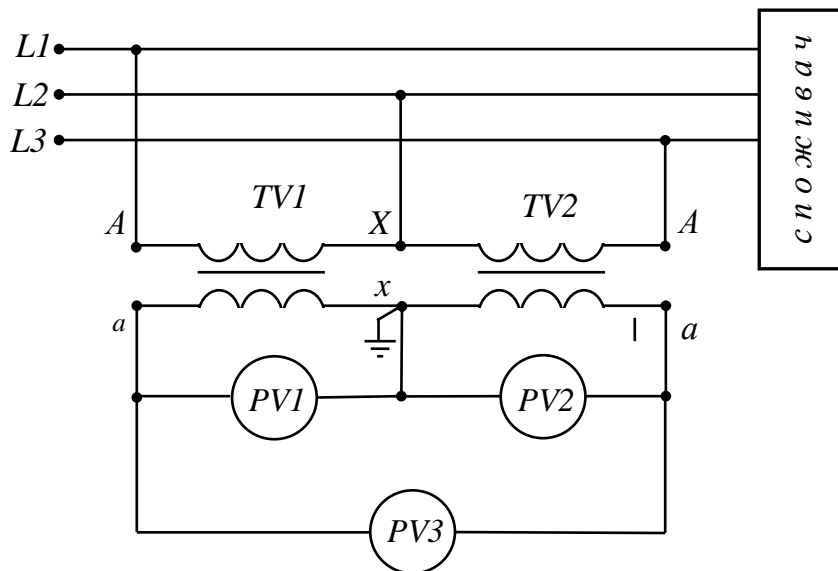


Рисунок 1.15 – Схема вимірювання лінійних напруг у несиметричному трифазному колі із застосуванням вимірювальних трансформаторів напруги

Так як номінальні коефіцієнти трансформації k_{UH} вимірювальних трансформаторів напруги $TV1, TA2$ однакові, тому то покази $U_{PV1} \dots U_{PV3}$ вольтметрів $PV1 \dots PV3$ будуть пропорційні до діючих значень лінійних напруг U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , які дорівнюють

$$U_{AB} = U_{PV1} \cdot k_{UH}; \quad U_{BC} = U_{PV2} \cdot k_{UH}; \quad U_{CA} = U_{PV3} \cdot k_{UH}. \quad (1.32)$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 1

- 1 Які вимірювальні перетворювачі застосовуються для розширення діапазону вимірювання вольтметрів та амперметрів при вимірюваннях у колах постійного струму?
- 2 Які засоби вимірювань використовуються при вимірюваннях постійного струму і напруги?
- 3 Які робочі засоби вимірювань використовуються при вимірюваннях змінних струмів і напруг? Які особливості при вимірюваннях змінних струмів та напруг?
- 4 Наведіть схеми вимірювання струму та напруг у колах постійного струму та у колах змінного струму.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 1

- 1 Визначити клас точності магнітоелектричного амперметра з границею вимірювання $0,75 \text{ мА}$ для вимірювання струму в діапазоні $0,3 \dots 0,75 \text{ мА}$, щоб відносна похибка не перевищувала $\pm 1,0 \%$.
- 2 Вибрати вольтметр (систему, границю вимірювання, клас точності) для вимірювання середньоквадратичного значення напруги $u(t) = 50 + 100 \sin \omega t, \text{ В}, f = 400 \text{ Гц}$, щоб відносна похибка не перевищувала $\pm 0,3 \%$.
- 3 Записати результат вимірювання струму на ділянці кола з опором 50 Ом за допомогою амперметра класу точності $0,2$ з границею вимірювання $0,3 \text{ А}$, з максимальним відліком шкали 100 і внутрішнім опором $0,1 \text{ Ом}$ за нормальних умов, якщо світловий покажчик амперметра зупинився на позначці шкали «98».

4 Чи можна виміряти струм 30 мА магнітоелектричним мілівольтметром з границею вимірювання 75 мВ і внутрішнім опором 5 Ом ?

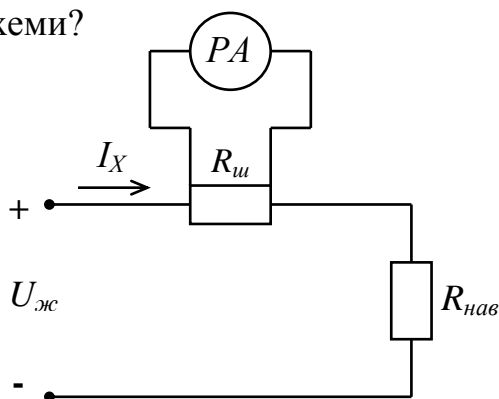
10 Вибрати вольтметр для прямого вимірювання спаду напруги на досліджуваному об'єкті, опір якого дорівнює 100 Ом , який під'єднаний до джерела струму $I_{ДЖ} = 2,5 \text{ А}$. Допустиме значення відносної похибки дорівнює $\delta_{\text{дон}} = \pm 0,7 \%$.

5 Вибрати амперметр для прямого вимірювання струму, що протікає у колі споживача, опір якого дорівнює 700 Ом , який під'єднаний до джерела живлення $E_{ДЖ} = 3,5 \text{ В}$, при цьому $R_{ДЖ} \cong 0$.

6 Визначити очікуваний показ амперметра з границею вимірювання 5 А , який під'єднаний до вторинної обмотки вимірювального трансформатора струму $75/5$, якщо орієнтоване значення струму, що протікає через споживач, дорівнює 55 А .

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Яке призначення наведеної схеми?



- 1 для вимірювання змінного струму амперметром із зовнішнім шунтом
- 2 для прямого вимірювання постійного струму амперметром
- 3 для прямого вимірювання постійної напруги у колі постійного струму
- 4 для вимірювання напруги вольтметром із додатковим резистором

2. Який метод вимірювання необхідно обрати для вимірювання лінійних струмів в трифазному трипровідному колі змінного струму при симетричному характері навантаженні?

- 1 метод одного амперметра
- 2 метод трьох амперметрів

3 метод двох амперметрів

4 метод трьох амперметрів, які включені через два вимірювальних трансформатора струму

3. Як вмикається вольтметр та додатковий резистор для вимірювання напруги у колах постійного та змінного струму?

1 безпосередньо

2 послідовно

3 паралельно

4 послідовно до джерела живлення

4. Який метод вимірювання необхідно обрати для вимірювання лінійної напруги в трифазному три провідному колі змінного струму при несиметричному навантаженні?

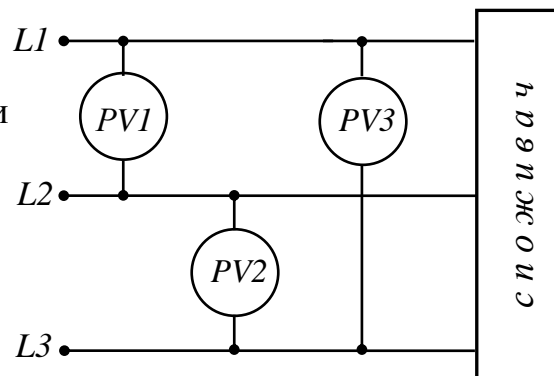
1 метод трьох вольтметрів

2 метод одного вольтметра

3 метод двох вольтметрів

4 метод трьох вольтметрів, які включені через два вимірювальних трансформатора напруги

5. Поясніть призначення наведеної схеми



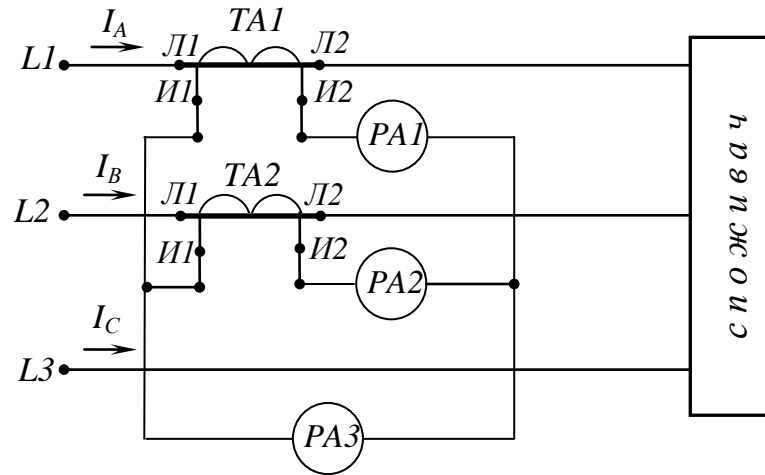
1 для вимірювання лінійної напруги в трифазному трипровідному колі при несиметричному характері навантаження

2 для вимірювання фазної напруги в трифазному трипровідному колі при несиметричному характері навантаження

3 для вимірювання лінійної напруги при симетричному характері навантаження

4 для вимірювання лінійних струмів в трифазному трипровідному колі при несиметричному характері навантаження

6. Оберіть вірну назву наведеної схеми вимірювання



- 1 схема вимірювання напруги з трьома вольтметрами та двома трансформаторами струму у несиметричних трифазних трипровідних колах
- 2 схема вимірювання струмів з двома амперметрами та двома трансформаторами струму у несиметричних трифазних трипровідних колах
- 3 схема прямого вимірювання струмів амперметром
- 4 схема вимірювання струмів з трьома амперметрами та двома трансформаторами струму у несиметричних трифазних трипровідних колах

7. Як аналітично визначається значення вимірюваного струму за показаннями амперметра, що включений через вимірювальний трансформатор струму?

$$1 \ U_{AB} = U_{PV1} \cdot k_{UH}$$

$$2 \ I_X = I_{PA} \cdot k_{IH}$$

$$3 \ U_{AB} = U_{PV1}$$

$$4 \ I_{PA} = C_{PA} \cdot N_{PA}$$

8. Як грабують більшість засобів вимірювальної техніки змінних струмів і напруги?

- 1 у миттєвих значеннях для синусоїдної форми кривої струму та напруги
- 2 у амплітудних значеннях
- 3 у середньовипрямлених значеннях
- 4 у середньоквадратичних (діючих) значеннях для синусоїдної форми кривої струму та напруги

9. Який метод вимірювання реалізується при безпосередньому паралельному включенні аналогового чи цифрового вольтметра до споживача?

- 1 метод прямого вимірювання напруги
- 2 метод опосередкованого вимірювання напруги
- 3 метод прямого вимірювання струму
- 4 метод прямого вимірювання потужності

10. Як аналітично визначається значення вимірюваної напруги за показаннями вольтметра, що включений через вимірювальний трансформатор напруги?

1 $U_{AB} = U_{PV1} \cdot k_{UH}$

2 $I_X = I_{PA} \cdot k_{IH}$

3 $U_{AB} = U_{PV1}$

4 $I_{PA} = C_{PA} \cdot N_{PA}$

РОЗДІЛ 2. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ

2.1 Загальні положення

Потужність є основною характеристикою більшості фізичних об'єктів, процесів та явищ, тому її вимірювання займає важливе місце серед методів вимірювань фізичних величин. У зв'язку з величезним зростанням споживання енергії, пошуком нових джерел енергії, упровадженням заходів з економії енергетичних ресурсів усе більшого значення набуває підвищення точності вимірювань потужності. У сучасній вимірювальній практиці доводиться вимірювати потужності від часток $nВт$ (потужність сигналів радіолокаційних станцій) до десятків $ГВт$ (потужність сучасних електричних станцій).

Методи вимірювання потужності істотно відрізняються один від одного залежно від виду і значення вимірюваної величини, частотного діапазону та параметрів кола, в якому здійснюються вимірювання. Специфічною є сама вимірювана величина – *потужність*, що безпосередньо не впливає на вимірювальний перетворювач, а впливають напруга U , струму I та значення кута зсуву фаз φ між ними. У зв'язку з цим всі вимірювання потужності поділяються на дві групи – *прямі* та *опосередковані* методи.

У разі *прямих* вимірювань активної потужності результат вимірювання пропорційний добутку вхідних величин - U , I та $\cos \varphi$, реалізують такі вимірювань за допомогою електродинамічних, феродинамічних, електронних аналогових і цифрових ватметрів, і застосовують для вимірювань всіх видів потужності як на постійному, так і на змінному струмі.

У разі *опосередкованих* вимірювань активної P , реактивної Q та повної S потужностей вимірюють вхідні величини U , I та $\cos \varphi$ чи $\sin \varphi$, а результат вимірювання отримують за допомогою обчислень за відомими в електротехніці формулами

$$\begin{aligned}
 P &= U \cdot I \cdot \cos \varphi = I^2 \cdot R, \text{ Вт}; \\
 Q &= U \cdot I \cdot \sin \varphi = I^2 \cdot X, \text{ Вар}; \\
 S &= U \cdot I = I^2 \cdot Z, \text{ В} \cdot \text{А}.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Найчастіше опосередковані вимірювання реалізують за допомогою амперметра і вольтметра та застосовують для вимірювань потужності постійного струму P і повної потужності змінного струму S .

На низьких частотах (до 10 кГц) використовують електродинамічні та феродинамічні ватметри, а на підвищених і високих частотах – електронні аналогові ватметри: ватметри з електростатичним вимірювальним механізмом і підсилювачами струму та напруги (до 100 кГц), ватметри з перетворювачами Холла (до 100 МГц). Усім перерахованим електромеханічним та електронним ватметрам властива невисока точність – клас точності становить 0,1 і нижче.

Вищу точність мають цифрові ватметри (похибка не перевищує $\pm 0,01\%$), а також високу точність, швидкодію та мають широкий діапазон вимірювання, надійність та технологічність, але їм властивий неширокий частотний діапазон (до 10 кГц).

2.2 Вимірювання активної потужності за допомогою амперметра і вольтметра

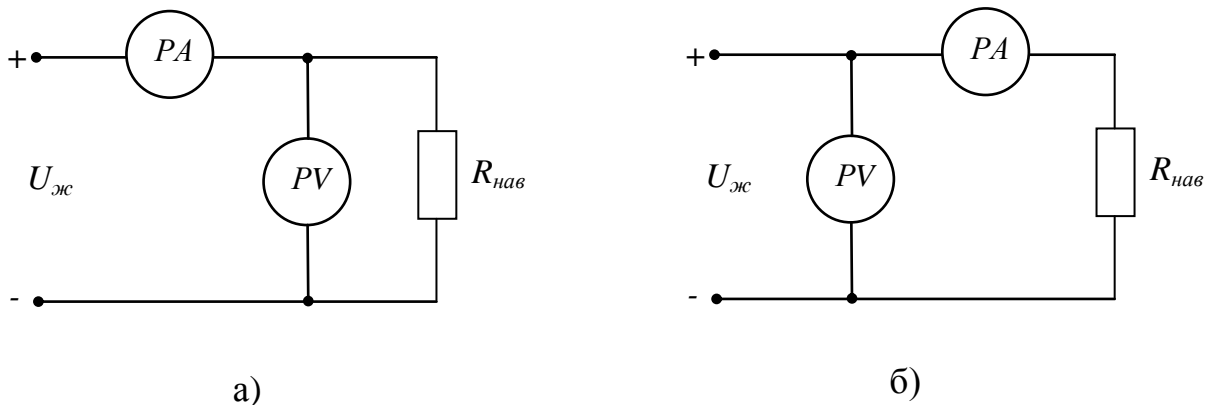
Активну потужність у колах постійного струму визначають опосередковано вимірюванням напруги та струму за допомогою вольтметра і амперметра відповідно

$$P_X = I_{PA} \cdot U_{PV}. \tag{2.2}$$

На рисунку 2.1 наведені дві схеми увімкнення приладів для вимірювання активної потужності у колах постійного струму. Схема на рисунку 2.1.а, має назву *правильного вимірювання напруги* і застосовується для вимірювання у колах споживачів з малим опором.

Схема на рисунку 2.1.б, має назву *правильного вимірювання струму* і застосовується для вимірювання у колах споживачів з великим опором.

Похибка вимірювання потужності таким методом складається з похибки вимірювання струму амперметром δ_I , похибки вимірювання напруги вольтметром δ_U і методичної похибки δ_m , яка зумовлена споживанням потужності самими приладами.



- а)
 б)
 а - схема правильного вимірювання напруги;
 б - схема правильного вимірювання струму

Рисунок 2.1 - Схема вимірювання активної потужності у колах постійного струму

Активна потужність споживача, яка обчислена за показами приладів, які увімкнені за схемою правильного вимірювання напруги, дорівнює

$$P_X = I_{PA} \cdot U_{PV} - \frac{U_{PV}^2}{R_{PV}}. \quad (2.3)$$

Методична похибка вимірювання потужності дорівнює

$$\delta_m = \frac{P - P_X}{P_X} \cdot 100\% = \frac{P_{PV}}{P_X} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

де P_{PV} – потужність, яку споживає вольтметр.

Мінімальне значення методичної похибки буде за умови $I_{PV} \ll I_X$, що можливе, якщо $R_{PV} \gg R_{нав}$, тому то схему правильного вимірювання напруги застосовують для вимірювання потужності споживачів з малим опором $R_{нав}$.

Активна потужність споживача, яка обчислена за показами приладів, які увімкнені за схемою правильного вимірювання струму, дорівнює

$$P_X = I_{PA} \cdot U_{PV} - I_{PA}^2 \cdot R_{PA}. \quad (2.5)$$

Методична похибка вимірювання потужності дорівнює

$$\delta_m = \frac{P - P_X}{P_X} \cdot 100\% = \frac{P_{PA}}{P_X} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

де P_{PA} – потужність, яку споживає амперметр.

Мінімальне значення методичної похибки буде за умови $U_{PA} \ll U_X$, що можливе, якщо $R_{PA} \gg R_{нав}$, тому схему правильного вимірювання напруги застосовують для вимірювання потужності споживачів з великим опором $R_{нав}$.

Для вимірювання сили струму і напруги на споживачі можна застосовувати компенсатор постійного струму або компаратор напруг, що дає змогу значно підвищити точність вимірювань, крім цього при компенсаційному методі вимірювання повністю відсутнє споживання потужності компенсатором від джерела сигналу, тобто методична похибка дорівнює нулю.

Таким чином, компенсатори постійного струму і компаратори напруг використовують для особливо точних вимірювань потужності, а саме, для метрологічної повірки ватметрів.

Недоліком опосередкованих вимірювань потужності методом амперметра і вольтметра є невисока точність і низька продуктивність праці, так як необхідно здійснювати вимірювання спочатку струму, потім напруги, а потім виконувати обчислення.

Значно зручнішими та швидшими є прямі вимірювання активної потужності за допомогою ватметрів.

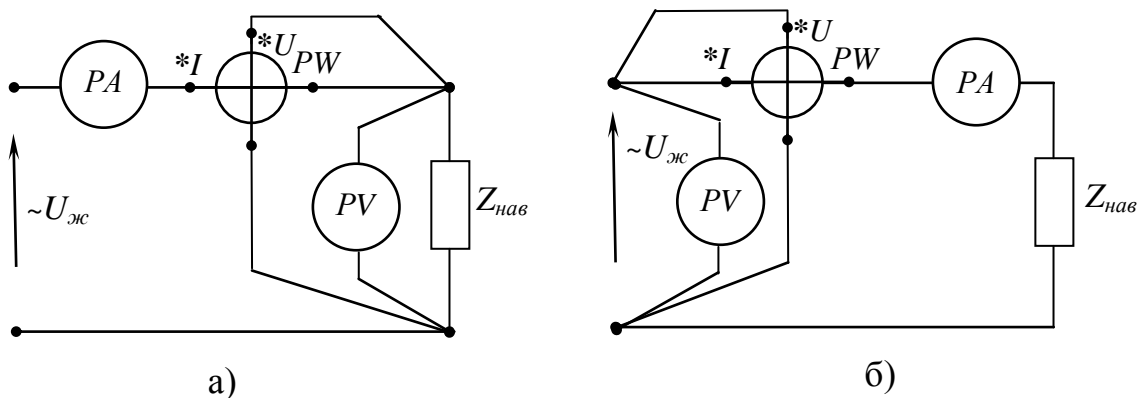
2.3 Вимірювання активної потужності за допомогою однофазних ватметрів

2.3.1 Схеми увімкнення ватметрів до кіл

Для вимірювання активної потужності в колах постійного та однофазних колах змінного струму на частотах до 10 кГц використовують електродинамічні та феродинамічні ватметри, а на вищих частотах – електронні аналогові ватметри.

Ватметри вмикають за схемою правильного вимірювання напруги – див. рисунок 2.2.а, або за схемою правильного вимірювання струму – див. рисунок 2.2.б.

Наявність у цих схемах вольтметра і амперметра дає змогу не тільки уникнути перевантаження кіл ватметра, а й опосередковано визначати низку додаткових параметрів споживача, таких, як повна потужність, коефіцієнт потужності та еквівалентний опір.



а) - схема правильного вимірювання напруги;

б) - схема правильного вимірювання струму

Рисунок 2.2 - Схема прямого вимірювання активної потужності ватметром у однофазних колах змінного струму

Потужність, яка виміряна ватметром, визначається за формулою

$$P_{PW} = C_{PW} \cdot N_{PW} = \frac{U_{K.PW} \cdot I_{K.PW} \cdot \cos \varphi_{H.PW}}{N_{PW \max}} \cdot N_{PW}, \quad (2.7)$$

де C_{PW} – стала ватметра;

N_{PW} – відлік за шкалою ватметра;

U_{KPW} , I_{KPW} – границі вимірювання ватметра за напругою і струмом відповідно;

$\cos \varphi_{H.PW}$ – номінальний коефіцієнт потужності ватметра;

N_{PWmax} – максимальний відлік за шкалою ватметра.

Найпоширеніші однофазні лабораторні ватметри мають такі метрологічні характеристики: $U_{KPW} = 30; 75; 150; 300; 450; 600 \text{ В}; I_{KPW} = 0,01; 0,02; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10 \text{ А}; ()$; $\cos \varphi_{H.PW} = 1,0; 0,1$; клас точності = $0,1; 0,2; 0,5$.

Слід відзначити, що в залежності від модифікації ватметри виготовляють на дві границі вимірювання за струмом із наведеного вище ряду, наприклад, $0,01$ і $0,02 \text{ А}$; ... 5 та 10 А .

Ватметри, в яких $\cos \varphi_{H.PW} = 0,1$ є малокосинусними і їх використовують переважно для вимірювання потужності споживачів, у яких $\cos \varphi_X < 0,5$, а у випадку, коли $\cos \varphi_X \geq 0,5$ застосовують ватметри з $\cos \varphi_{H.PW} = 1$.

Як вже зазначалось вище, крім активної потужності за схемами (див. рисунок 2.2) можна визначати низку інших параметрів споживача

$$S_X = U_X \cdot I_X; \quad (2.8)$$

$$\cos \varphi_X = \frac{P_X}{U_X \cdot I_X}; \quad (2.9)$$

$$Q_X = U_X \cdot I_X \cdot \sin \varphi_X. \quad (2.10)$$

Граничне значення основної похибки ватметра $\delta_{PW.zp}$ знаходять за формулою

$$\delta_{PW.zp} = \pm \gamma_{PW.zp} \cdot \frac{P_{K.PW}}{P_{PW}} = \pm \gamma_{PW.zp} \cdot \frac{N_{PW.max}}{N_{PW}}, \quad (2.11)$$

де $\gamma_{PW.zp}$ – граничне значення основної зведеної похибки ватметра, яка чисельно дорівнює його класу точності.

2.3.2 Розширення границь вимірювань ватметрів на змінному струмі при вимірюванні активної потужності

Безпосереднє увімкнення ватметра в коло споживача за схемами, які зображені на рисунку 2.2, здійснюють при значеннях струмів до 10 А і напруг до 600 В.

Для розширення границь вимірювання ватметрів на змінному струмі застосовують вимірювальні трансформатори струму та вимірювальні трансформатори напруги – рисунки 2.3 та 2.4 відповідно.

Схему, яка наведена на рисунку 2.3, використовують для вимірювання активної потужності споживачів за напругою ($U_X \leq 600$ В), якщо струм споживача I_X перевищує границю вимірювання ватметра за струмом $I_{K.PW}$, при цьому $I_X > I_{K.PW}$ або, навпаки, є набагато меншим від неї ($I_X \ll I_{K.PW}$).

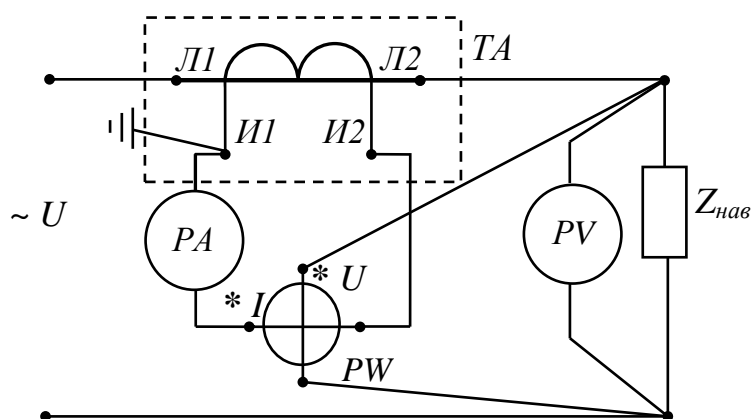


Рисунок 2.3 – Схема вимірювання активної потужності і струму однофазних споживачів з використанням вимірювального трансформатора струму

Виміряні значення активної потужності і струму знаходять за показами ватметра та амперметра з урахуванням номінального коефіцієнта трансформації k_{IH} вимірювального трансформатора струму

$$P = P_{PW} \cdot k_{IH} = C_{PW} \cdot N_{PW} \cdot k_{IH}; \quad (2.12)$$

$$I = I_{PA} \cdot k_{IH} = C_{PA} \cdot N_{PA} \cdot k_{IH}. \quad (2.13)$$

Схему, що наведена на рисунку 2.4, використовують для вимірювання активної потужності споживачів за високої напруги ($U_X > 600 \text{ В}$) та при значеннях струму споживача I_X , який перевищує границю вимірювання ватметра за струмом $I_{K.PW}$, при цьому $I_X > I_{K.PW}$.

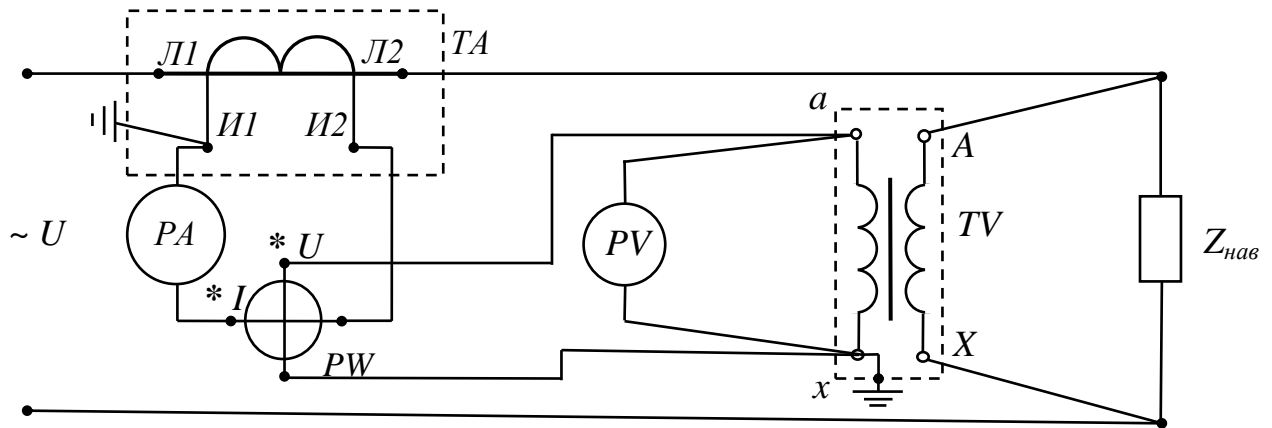


Рисунок 2.4 - Схема вимірювання активної потужності і струму однофазних споживачів з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги

Виміряні значення активної потужності, струму і напруги знаходять за показами ватметра, амперметра і вольтметра з урахуванням номінальних коефіцієнта трансформації k_{IH} вимірювального трансформатора струму та коефіцієнта трансформації k_{UH} вимірювального трансформатора напруги

$$I = I_{PA} \cdot k_{IH} = C_{PA} \cdot N_{PA} \cdot k_{IH}; \quad (2.14)$$

$$U = U_{PV} \cdot k_{UH} = C_{PV} \cdot N_{PV} \cdot k_{UH}; \quad (2.15)$$

$$P = P_{PW} \cdot k_{IH} \cdot k_{UH} = C_{PW} \cdot N_{PW} \cdot k_{IH} \cdot k_{UH}. \quad (2.16)$$

2.4 Вимірювання активної потужності у колах трифазного змінного струму

Активну потужність у трифазному колі (як симетричному, так і несиметричному) вимірюють за допомогою ватметрів, які увімкнені на відповідні струми та напруги.

У чотирипровідному несиметричному трифазному колі використовують три однофазні ватметри, які увімкнені на фазні струми та напруги – рисунок 2.5.

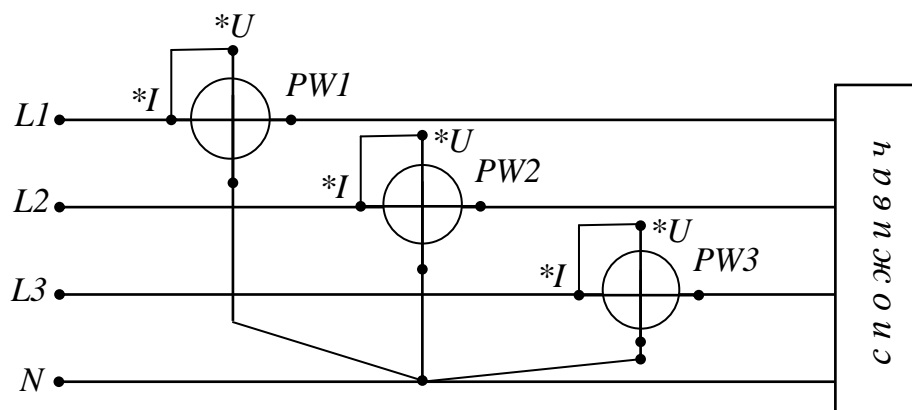


Рисунок 2.5 – Схема вимірювання активної потужності у чотирипровідному несиметричному трифазному колі за методом трьох ватметрів

Вимірне значення активної потужності кола дорівнює сумі показів трьох ватметрів з формулою

$$P_{\text{кола}} = P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}. \quad (2.17)$$

За умови повної симетрії в чотирипровідній трифазній системі можна застосовувати тільки один ватметр, увімкнений за схемою, що наведений на рисунку 2.5.а, у будь-яку фазу, показ якого множать на 3 - за кількістю фаз, за формулою

$$P_{\text{кола}} = 3 \cdot P_{PW}. \quad (2.18)$$

У три провідному несиметричному трифазному колі для вимірювання активної потужності застосовуються два ватметри, струмові кола яких вмикають у будь-які дві лінії, а кола напруги генераторними кінцями під'єднують до цих самих ліній, а вільними кінцями кіл напруги – до вільної від приладів лінії трифазного кола – рисунок 2.6.

Вимірне значення активної потужності кола за таким методом дорівнює сумі показів двох ватметрів з формулою

$$P_{\text{кола}} = P_{PW1} + P_{PW2}. \quad (2.19)$$

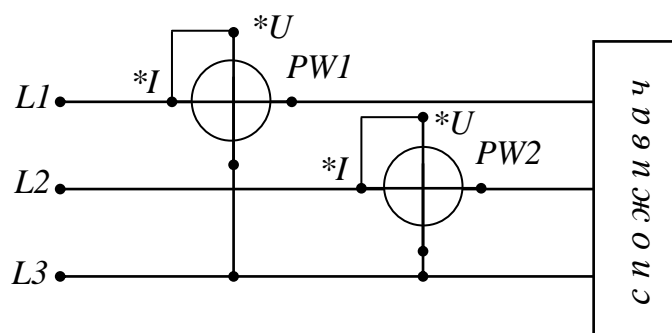


Рисунок 2.6 – Схема вимірювання активної потужності у трипровідному несиметричному трифазному колі за методом двох ватметрів

Слід зауважити, що можливі такі режими роботи трифазного кола в залежності від характеру навантаження, коли показчик одного з ватметрів відхиляється ліворуч від нуля, незважаючи на правильне увімкнення ватметра до кола.

Щоб зробити відлік у такому разі та правильно записати виміряне значення активної потужності усього трифазного кола, необхідно змінити напрямок струму в одному з кіл цього ватметра, а його показ записати зі знаком мінус.

Отже, для визначення активної потужності усього трифазного кола змінного струму необхідно враховувати при розрахунках алгебраїчну суму показів ватметрів з урахуванням їх знаків і тому необхідно суворо дотримуватися принципу правильного під'єднання генераторних та вільних затискачів кіл напруги та струму ватметрів.

У трифазному симетричному колі, коли споживач увімкнений за схемою «трикутник» або «зірка» без можливості доступу до нульової точки, для вимірювання активної потужності можна застосовувати схему з одним ватметром, в якій резистори R_1 , R_2 і коло напруги ватметра R_{UPW} утворюють штучну нульову точку «0» - рисунок 2.7, при цьому необхідне виконання умови $R_1 = R_2 = R_{UPW}$.

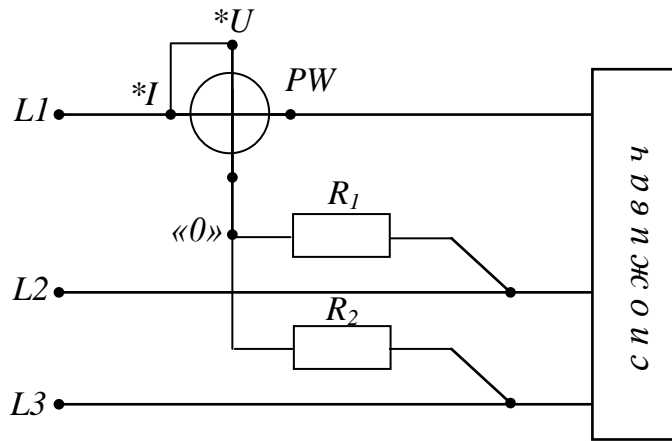


Рисунок 2.7 – Схема вимірювання активної потужності за методом одного ватметра та штучною нульовою точкою

Вимірне значення активної потужності кола дорівнює

$$P_{\text{кола}} = 3 \cdot P_{PW}. \quad (2.20)$$

На практиці поряд з однофазними ватметрами використовують і трифазні ватметри, які дають можливість отримати значення активної потужності трифазного споживача без додаткових обчислень. Такі ватметри поєднують в одному приладі два або три однофазні вимірювальні механізми, які знаходяться на одній спільній осі, на яку діють обертальні моменти, які виникають в одноелементних механізмах.

Найбільшого розповсюдження одержали феродинамічні трифазні ватметри. Вмикання ватметрів у трифазне коло здійснюється за тими самими схемами, які аналогічні до відповідних схем вмикання однофазних ватметрів. Через великий обертальний момент феродинамічні ватметри виготовляють у вигляді самописних приладів.

Для розширення границь вимірювання струму струмові кола ватметрів вмикають через вимірювальні трансформатори струму, а при вимірюванні у колах, де напруга перевищує 600 В, застосовують вимірювальні трансформатори струму та напруги – рисунок 2.8.

У такому разі вимірне значення потужності визначається за формулою

$$P_{\text{кола}} = (P_{PW1} + P_{PW2}) \cdot k_{IH} \cdot k_{UH}. \quad (2.21)$$

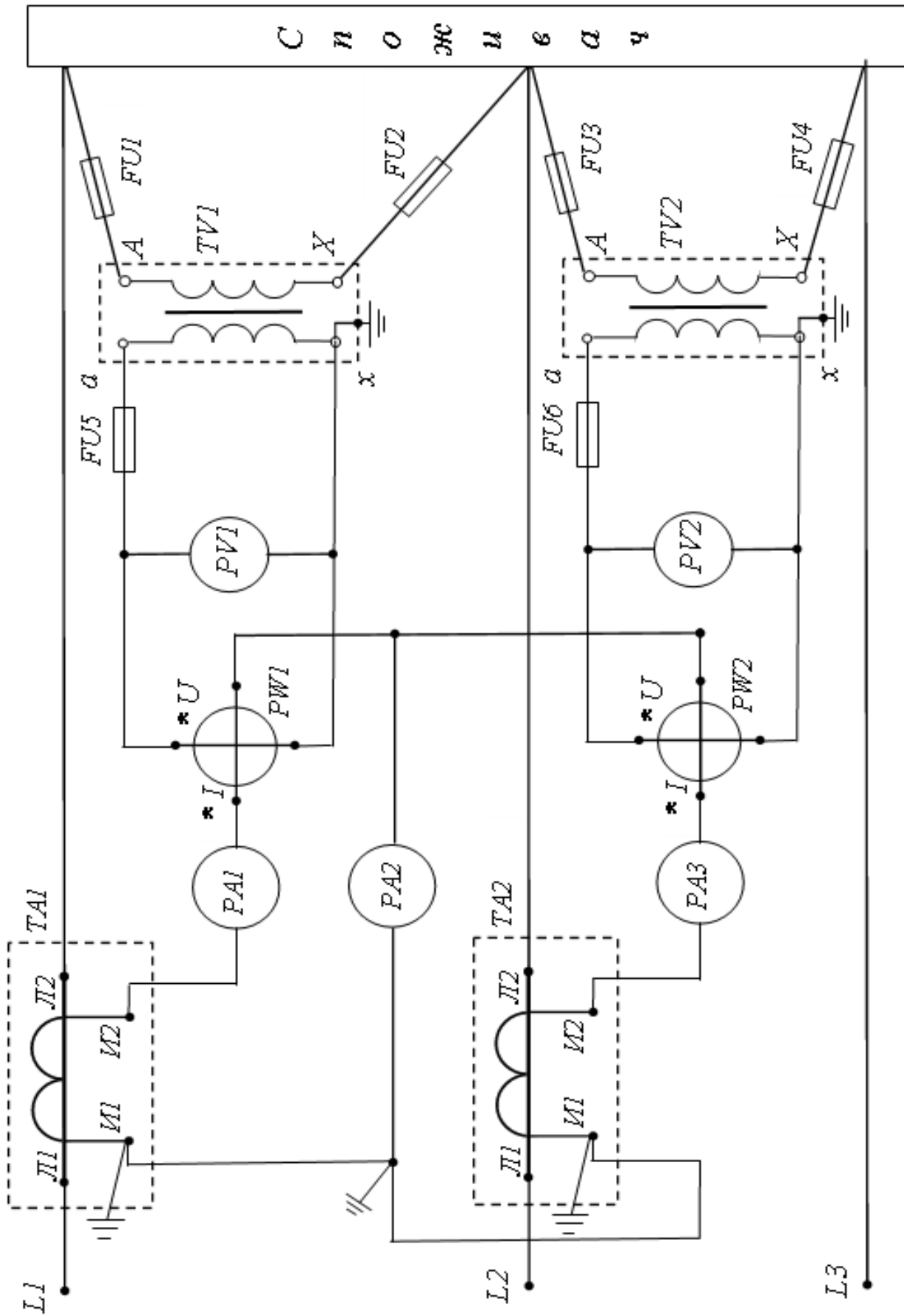


Рисунок 2.8 – Схема вимірювання активної потужності трифазних споживачів з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги

2.5 Вимірювання реактивної потужності у колах трифазного змінного струму

Наявність реактивної потужності в енергетичних колах, особливо трифазних, досить негативно впливає на роботу споживачів електричної енергії. Тому поряд з вимірюванням активної потужності, необхідно вимірювати й реактивну.

Вимірювання реактивної потужності має практичне значення тільки для потужних споживачів електроенергії, які підключаються до трифазних кіл.

Тому в однофазних колах реактивна потужність вимірюється тільки в лабораторних умовах при проведенні досліджень. Прилади для вимірювання реактивної потужності в однофазних колах змінного струму не випускаються.

Для вимірювання реактивної потужності у трифазних колах у промислових умовах застосовують *трифазні варметри* – це вимірювачі реактивної потужності.

Реактивну потужність Q трифазного споживача визначають як суму реактивних потужностей окремих фаз

$$Q_{\text{кола}} = U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi + U_B \cdot I_B \cdot \sin \varphi + U_C \cdot I_C \cdot \sin \varphi. \quad (2.22)$$

З виразу (2.22) можна зробити висновок, що реактивна потужність може бути виміряна такими самими приладами, що й активна, тільки обертальний момент вимірювальних механізмів таких приладів повинен бути пропорційний не значенню $\cos \varphi$, а значенню $\sin \varphi$.

Цього можна досягти, увімкнувши прилади за спеціальним схемами. Для того, щоб відхилення рухомої частини електро- чи феродинамічних механізмів ватметрів було пропорційне значенню $\sin \varphi$, на них потрібно подати напругу, що відстає за фазою на кут 90° від напруги, яка подається до приладу при вимірюванні активної потужності.

Розглянемо метод вимірювання реактивної потужності – метод трьох ватметрів. Така схема підключення має назву *схема із заміненими напругами*.

Відомо, що активна потужність трифазного кола дорівнює

$$\begin{aligned} P_{\text{кола}} &= U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi + U_B \cdot I_B \cdot \cos \varphi + U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi; \\ P_{\text{кола}} &= P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Для вимірювання реактивної потужності необхідно замінити фазні напруги на лінійні, які відстають на кут 90° згідно схеми, що наведена на рисунку 2.9.

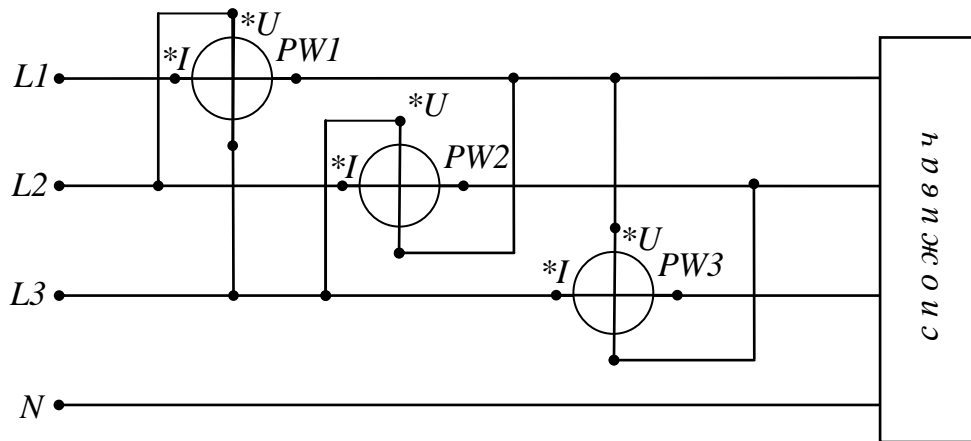


Рисунок 2.9 – Схема вимірювання реактивної потужності трифазних споживачів методом трьох ватметрів

У виразі (2.23) замість фазної напруги U_A повинна бути лінійна напруга U_{BC} , яка відстає від U_A на кут 90° , замість фазної напруги U_B - напруга U_{CA} і замість U_C - напруга U_{AB} .

Сума показів ватметрів дорівнює

$$\begin{aligned} P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3} &= \\ &= U_{BC} \cdot I_A \cdot \cos(90^\circ - \varphi_A) + U_{CA} \cdot I_B \cdot \cos(90^\circ - \varphi_B) + U_{AB} \cdot I_C \cdot \cos(90^\circ - \varphi_C). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Напруги $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$; $U_A = U_B = U_C = U_\Phi$; $U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi$.

З урахуванням цього вираз (2.24) буде мати вигляд

$$\begin{aligned} P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3} &= \\ &= \sqrt{3} \cdot (U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi_A + U_B \cdot I_B \cdot \sin \varphi_B + U_C \cdot I_C \cdot \sin \varphi_C) = \sqrt{3} \cdot Q_{\text{кола}}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Реактивна потужність трифазного кола буде дорівнювати

$$Q_{\text{кола}} = \frac{P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}}{\sqrt{3}}. \quad (2.26)$$

Система струмів може бути несиметричною. В дужках виразу (2.25) кожна складова пропорційна реактивній потужності відповідної фази споживача, тому то за показами кожного з ватметрів можна визначати реактивну потужність тієї фази споживача, струм якої протікає через даний ватметр.

Для правильного підключення ватметрів потрібно знати послідовність фаз. Струмові кола кожного ватметра вмикають послідовно в одну з трьох ліній трифазного кола, а затискачі кола напруги приєднують до двох інших ліній, так, щоб генераторний затискач був приєднаний до лінії, яка є наступною у послідовності фаз ABCABC... за тією фазою, до якої увімкнено струмове коло приладу.

Розглянемо метод вимірювання реактивної потужності – метод двох ватметрів, які увімкнені за схемою зі штучним нулем – рисунок 2.10. Метод застосовується у трифазних три провідних колах за умови повної симетрії чи часткової несиметрії.

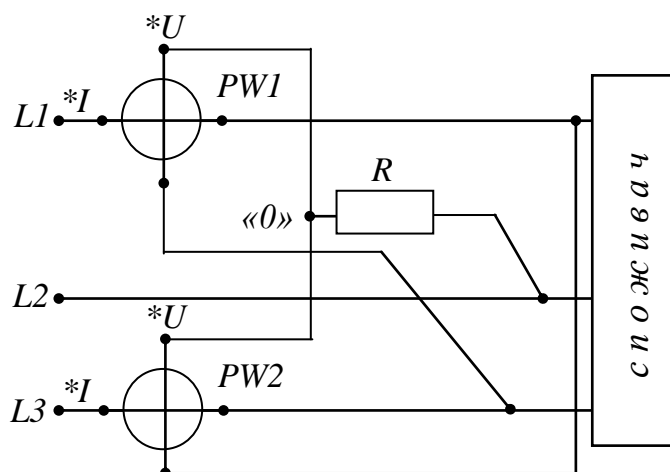


Рисунок 2.10 – Схема вимірювання реактивної потужності за методом двох ватметрів, які увімкнені за схемою зі штучною нульовою точкою

Для утворення штучної нульової точки в схемі необхідно, щоб опір допоміжного резистора R дорівнював значенням опорів кіл напруги R_{UPW1} та R_{UPW2} двох ватметрів: $R = R_{UPW1} = R_{UPW2}$.

Вимірне значення реактивної потужності усього трифазного кола дорівнює

$$Q_{\text{кола}} = (P_{PW1} + P_{PW2}) \cdot \sqrt{3}. \quad (2.27)$$

Слід відзначити, що при вимірюванні активної потужності за методом двох ватметрів (див. рисунок 2.5) у разі повної симетрії трифазного кола можна одночасно з активною потужністю визначити й реактивну потужність за формулою

$$Q_{\text{кола}} = (P_{PW2} - P_{PW1}) \cdot \sqrt{3}. \quad (2.28)$$

Якщо лінійні струми трифазного кола більші, ніж границі вимірювання ватметрів за струмом, то їх струмові кола вмикають через вимірювальні трансформатори струму, а якщо напруги перевищують 600 В, застосовують вимірювальні трансформатори струму та напруги.

Якщо $k_{UH1} = k_{UH2} = k_{UH}$ і $k_{IH1} = k_{IH2} = k_{IH}$, то вимірне значення реактивної потужності дорівнює

$$Q_{\text{кола}} = k_{IH} \cdot k_{UH} \cdot (P_{PW1} + P_{PW2}) \cdot \sqrt{3}. \quad (2.29)$$

Приклад 2.1 Вибрати засоби вимірювальної техніки та схему їх увімкнення для вимірювання реактивної потужності трифазного симетричного споживача, вітки якого з'єднані за схемою «зірка» без нульової точки і складаються із послідовно увімкнених резистора з активним опором $R = 48 \text{ Ом}$ та котушки з реактивним опором $X_L = 20 \text{ Ом}$. Лінійна напруга кола дорівнює 220 В.

Розв'язання 1. Визначаємо орієнтовне значення повного опору Z_ϕ фази споживача

$$Z_\phi = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{48^2 + 20^2} = 52 \text{ Ом}.$$

2. Визначаємо орієнтовне значення лінійного струму I_L

$$I_\phi = I_L = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 52} = 2,45 \text{ Ом}.$$

3. Визначаємо орієнтовне значення кута зсуву фаз φ між фазним струмом та фазною напругою

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_L}{R} = \operatorname{arctg} \frac{20}{52} = 21^\circ.$$

4. Визначаємо орієнтовне значення реактивної потужності

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 2,45 \cdot 0,36 = 334 \text{Var}.$$

5. Для вимірювання реактивної потужності трифазного три провідного симетричного кола доцільно застосувати схему з двома ватметрами (див. рисунок 2.5), а вимірне значення визначимо за формулою (2.28). Два ватметри вмикаються на лінійні напруги 220 В та на лінійні струми 2,45 А. Тому то обираємо два ватметри типу Д5004/2 з такими метрологічними характеристиками: клас точності 0,5; $U_{KPW}=300 \text{ В}$; $I_{KPW}=2,5 \text{ А}$; $\cos \varphi_{H.PW} = 1$; максимальний відлік 150.

6. Очікувані покази ватметрів P_{PW1} та P_{PW2} визначаються з виразів

$$P_{PW1} = U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \cos(30 + \varphi) = 220 \cdot 2,45 \cdot \cos 51^\circ = 339 \text{Вт};$$

$$P_{PW2} = U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \cos(30 - \varphi) = 220 \cdot 2,45 \cdot \cos 9^\circ = 532 \text{Вт}.$$

7. Перевіримо умову 4 завдання за формулою (2.28)

$$Q_{кола} = (P_{PW2} - P_{PW1}) \cdot \sqrt{3} = (532 - 339) \cdot \sqrt{3} = 334 \text{Var}.$$

8. Очікувані покази ватметрів N_{PW1} та N_{PW2} , за умови, що стала ватметрів дорівнює

$$C_{PW} = \frac{U_{K.PW} \cdot I_{K.PW} \cdot \cos \varphi_{H.PW}}{N_{PW.\max}} = \frac{300 \cdot 2,5 \cdot 1,0}{150} = 5 \text{Вт} / \text{поділ};$$

$$N_{PW1} = \frac{P_{PW1}}{C_{PW}} = \frac{339}{5} \cong 68 \text{поділок}; \quad N_{PW2} = \frac{P_{PW2}}{C_{PW}} = \frac{532}{5} \cong 107 \text{поділок};$$

$$N_{PW1} \cong 68 \text{поділок} < N_{PW.\max} = 150 \text{поділки};$$

$$N_{PW2} \cong 107 \text{поділок} < N_{PW.\max} = 150 \text{поділки}.$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 2

- 1 Які види приладів застосовуються для вимірювання активної та реактивної потужності?
- 2 Як аналітично визначається активна потужність трифазного трипровідного кола при симетричному характері навантаження за методом одного ватметра?
- 3 Поясніть принцип включення ватметра для вимірювання реактивної потужності.
- 4 Як аналітично визначається реактивна потужність трифазного трипровідного кола при симетричному характері навантаження за методом одного ватметра?
- 5 Які методи необхідно обрати для вимірювання активної та реактивної потужності в трифазному трипровідному колі змінного струму при симетричному характері навантаження? Як аналітично визначаються активна та реактивна потужність трифазного трипровідного кола за вище обраним методом?
- 6 Як виміряти активну та реактивну потужності в трифазному чотирипровідному колі змінного струму при симетричному характері навантаження?
- 7 Поясніть від чого залежить кількість ватметрів при вимірюванні активної та реактивної потужності в трифазних колах змінного струму?

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 2

- 1 Вибрати необхідні засоби вимірювальної техніки та схему їх увімкнення для вимірювання активної потужності трифазного симетричного споживача, вітки якого з'єднані за схемою «зірка» без нульової точки. Орієнтовне значення потужності 10 кВт при фазній напрузі 127 В і фазному струмі 40 А .
- 2 Вибрати необхідні засоби вимірювальної техніки та схему їх увімкнення для вимірювання реактивної потужності трифазного симетричного споживача, вітки якого з'єднані за схемою «трикутник». Орієнтовне значення потужності 400 Вар при фазній напрузі 220 В і фазному струмі $1,5 \text{ А}$.
- 3 Для вимірювання активної потужності у частково-симетричному трифазному колі застосували два однофазні ватметри класу точності $0,5$ з границями вимірювання $2,5 \text{ А}$ і 300 В , $\cos \varphi_{H.PW} = 1$ і максимальним відліком 150 . Визначити ак-

тивну, реактивну та повну потужність трифазного споживача, якщо отримані покази за шкалами ватметрів 100 і 130 поділок.

4 Для вимірювання активної потужності у повністю симетричному трифазному колі застосували один однофазний ватметр класу точності 0,2 з границями вимірювання 5 А і 150 В, $\cos \varphi_{H.PW} = 1$ і максимальним відліком 150, який увімкнений у коло через вимірювальний трансформатор струму класу точності 0,2 з коефіцієнтом трансформації 1000/5 та вимірювальний трансформатор напруги класу точності 0,5 з коефіцієнтом трансформації 5000/150. Записати результати вимірювань, якщо відлік на шкалі ватметра дорівнює 100 поділок.

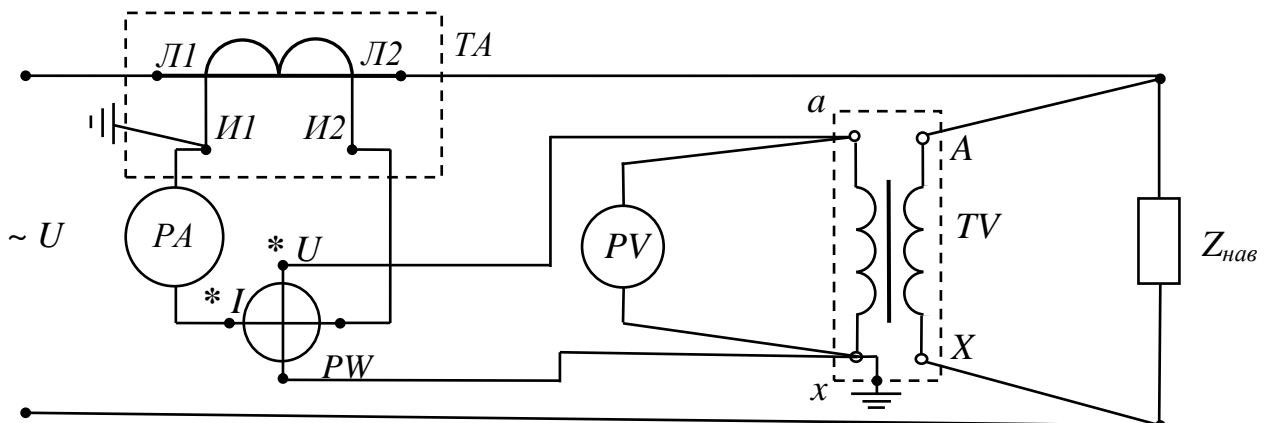
5 Для вимірювання реактивної потужності у частково симетричному колі трифазному колі використали два однофазні ватметри класу точності 0,5 з границям вимірювань 0,5 А та 450 В, $\cos \varphi_{H.PW} = 1$ і максимальним відліком 150. Записати результат вимірювання, якщо отримано покази на шкалах ватметрів 140 і 80 поділок.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 2

1. За допомогою яких приладів реалізують опосередковані вимірювання потужності у колах постійного та змінного струму?

- 1 варметрів
- 2 амперметрів і вольтметрів
- 3 вимірювальних мостів
- 4 фазометрів

2. Яке призначення наведеної схеми?



1 для вимірювання активної потужності в однофазному колі змінного струму, коли верхня границя за струмом ватметра менша, ніж струм споживача та верхня границя за напругою ватметра менша, ніж напруга живлення

2 для вимірювання струму в однофазному колі змінного струму

3 для вимірювання активної потужності в однофазному колі змінного струму, коли верхня границя за струмом ватметра менша, ніж струм споживача та верхня границя за напругою ватметра менша, ніж напруга живлення

4 для вимірювання напруги в однофазному колі змінного струму

3. Який метод необхідно обрати для вимірювання активної потужності в трифазному трипровідному колі змінного струму при несиметричному характері навантаження?

1 метод двох ватметрів, які включені за *cos*-схемою

2 метод одного ватметра

3 метод трьох ватметрів

4 метод двох ватметрів, які включені за *sin*-схемою

4. Як аналітично визначається активна потужність трифазного чотирипровідного кола при несиметричному характері навантаження за методом трьох ватметрів?

1 $P_{КОЛА} = P_{PW1} + P_{PW2}$

2 $P_{КОЛА} = P_{PW} \cdot k_{IH} \cdot k_{UH}$

3 $P_{КОЛА} = P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}$

4 $P_{КОЛА} = (P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}) \cdot k_{IH}$

5. Визначте активну потужність, *Вт*, трифазного три провідного кола змінного струму, якщо при застосуванні методу двох ватметрів результати вимірювань за показаннями приладів дорівнюють: $P_{PW1} = 400 \text{ Вт}$, $P_{PW2} = 300 \text{ Вт}$.

1 700 Вт

2 400 Вт

3 300 Вт

4 200 Вт

6. До однофазного кола змінного струму включений феродинамічний ватметр, дві котушки якого розраховані на силу струму 5 A та на напругу 150 B , зі шкалою на 150 поділок. Прилад включений через вимірювальні трансформатори струму $50/5$ і напруги $500/100$. Визначте активну потужність кола, W_t , якщо відлік приладу дорівнює «45».

- 1 11250 Вт
- 2 225 Вт
- 3 2250 Вт
- 4 1125 Вт

7. Який метод необхідно обрати для одночасного вимірювання як активної, так й реактивної потужності в трифазному трипровідному колі при симетричному та несиметричному характері навантаження?

- 1 метод двох ватметрів
- 2 метод одного ватметра
- 3 метод трьох ватметрів
- 4 метод амперметра і вольтметра

8. Які прилади призначені для прямого вимірювання реактивної потужності у колах змінного струму?

- 1 ватметри
- 2 амперметр, вольтметр та фазометр
- 3 два ватметри
- 4 варметр

9. До трифазного три провідного кола змінного струму з симетричним характером навантаження через вимірювальні трансформатори струму $10/5$ та напруги $500/100$ включений електродинамічний ватметр для вимірювання реактивної потужності. Результат вимірювань за показанням приладу дорівнює 100 Вт . Визначити реактивну потужність, Var , трифазного кола змінного струму.

- 1 100 Var
- 2 500 Var
- 3 200 Var
- 4 1732 Var

10. Як аналітично визначається реактивна потужність трифазного чотирипровідного кола при симетричному характері навантаження за методом трьох ватметрів?

$$1 \quad Q_{\text{кола}} = \frac{P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}}{\sqrt{3}}$$

$$2 \quad Q_{\text{кола}} = (P_{PW2} - P_{PW1}) \cdot \sqrt{3}$$

$$3 \quad P_{\text{КОЛА}} = P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}$$

$$4 \quad Q_{\text{кола}} = (P_{PW1} + P_{PW2}) \cdot \sqrt{3}$$

РОЗДІЛ 3. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

3.1 Загальні положення

Електрична енергія, яка спожита споживачем за проміжок часу $t = t_2 - t_1$, дорівнює

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt, \quad (3.1)$$

де P – потужність, яку споживає об'єкт.

Прилад, який призначений для вимірювання електричної енергії, повинен бути *інтегрувальним* за принципом дії та реагувати на величину *потужності* споживача і мати *лічильний пристрій обліку*. Для вимірювань витрат енергії у колах постійного та змінного струму для промислових та побутових потреб застосовують лічильники електричної енергії, у вимірювальній частині яких використовують вимірювальний механізм індукційної системи або електронний інтегратор.

У зв'язку з цим за принципом дії лічильники поділяють на дві основні групи: *електромеханічні лічильники* з індукційним вимірювальним механізмом та *електронні лічильники* з цифровим відліком. В промисловості та в побуті найпоширенішими відповідно є трифазні лічильники активної енергії та однофазні лічильники активної енергії.

3.2 Схеми увімкнення індукційних лічильників електричної енергії

Лічильники електричної енергії до однофазних кіл підключають до споживача або безпосередньо або з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

На рисунку 3.1 наведена схема безпосереднього під'єднання однофазного лічильника до споживача, на якій літерами G позначені генераторні клеми лічильника, а літерами H – клеми підключення навантаження.

Дійсна витрата активної електричної енергії за поточний період ΔW визначається за формулою

$$\Delta W = W_{\text{кінець}} - W_{\text{початок}}, \quad (3.2)$$

де $W_{\text{кінець}}$, $W_{\text{початок}}$ – показання лічильника наприкінці та на початку поточного періоду відповідно, $\text{кВт}\cdot\text{год}$.

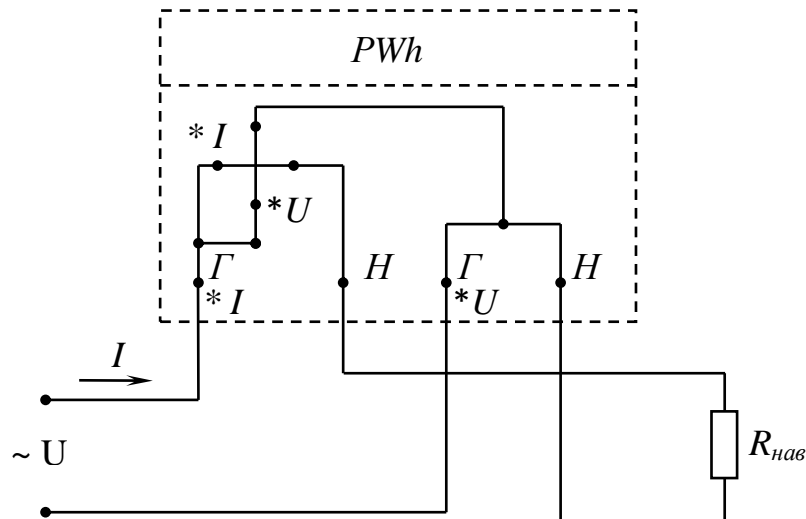


Рисунок 3.1 - Схема безпосереднього під'єднання однофазного лічильника до споживача

На рисунку 3.2 наведена схема під'єднання однофазного лічильника до споживача через вимірювальні трансформатори струму та напруги.

Дійсна витрата активної електричної енергії за поточний період ΔW визначається за формулою

$$\Delta W = k_{IH} \cdot k_{UH} \cdot (W_{\text{кінець}} - W_{\text{початок}}), \quad (3.3)$$

де $W_{\text{кінець}}$, $W_{\text{початок}}$ – показання наприкінці та на початку поточного періоду відповідно, $\text{кВт}\cdot\text{год}$.

На рисунку 3.3 наведена схема під'єднання трифазного індукційного лічильника через вимірювальні трансформатори струму та напруги.

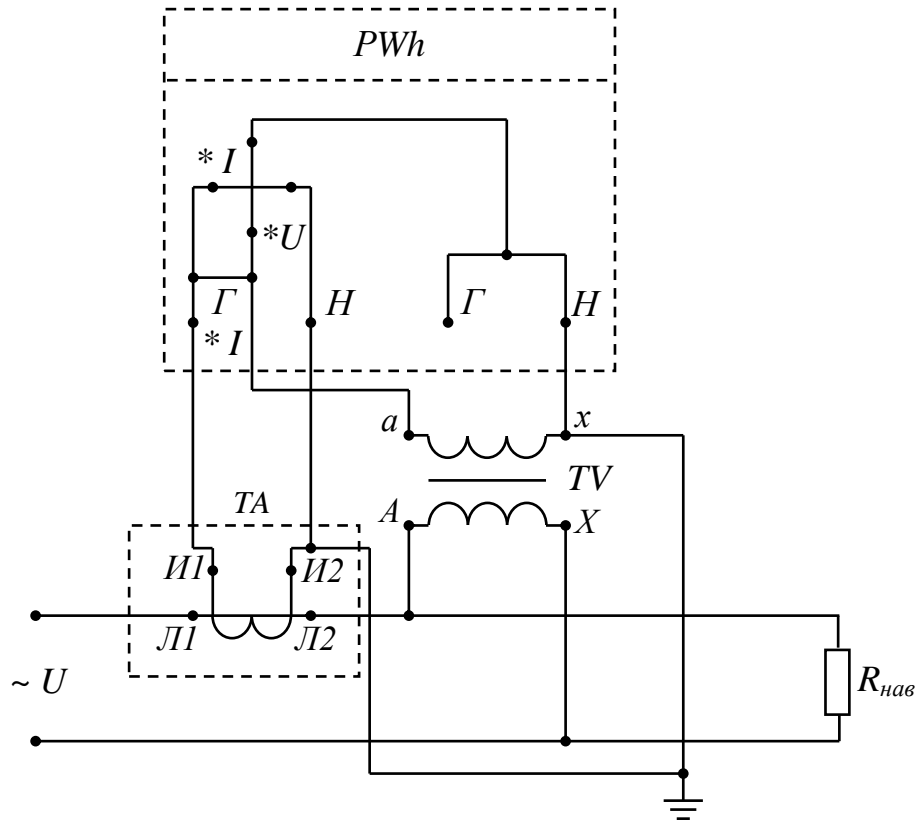


Рисунок 3.2 - Схема під'єднання однофазного лічильника до споживача через вимірювальні трансформатори струму та напруги

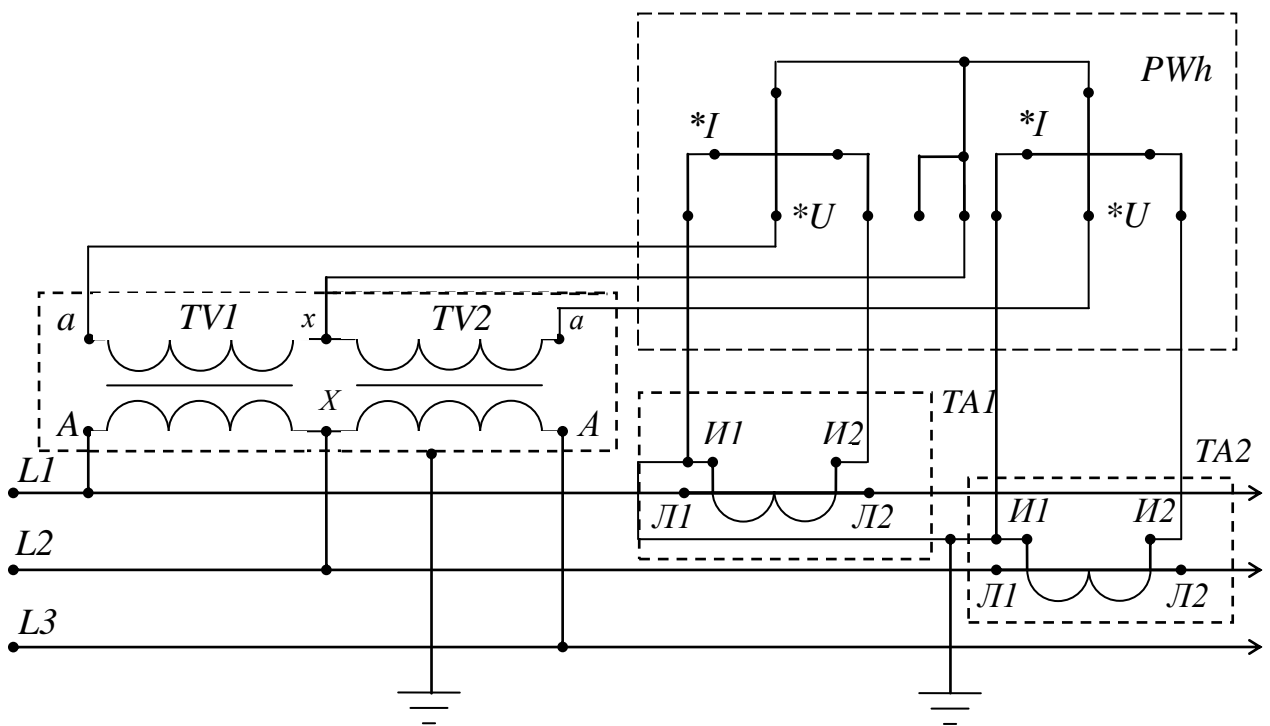


Рисунок 3.3 - Схема під'єднання трифазного індукційного лічильника через вимірювальні трансформатори струму та напруги

3.3 Електронні лічильники електричної енергії

Одним із недоліків індукційних лічильників електричної енергії є невисока точність та вузький частотний діапазон (45...60 Гц).

Значно вищу точність мають електронні лічильники, в яких застосовують електронний інтегратор та спеціальні електронні вузли, які необхідні для одержання сигналу, пропорційного до спожитої енергії, з подальшим аналого-цифровим його перетворенням і цифровим відліком результату вимірювання. В електронних лічильниках вихідний сигнал у цифровому коді можна використовувати у схемах автоматизованого обліку електроенергії.

Електронні лічильники використовують для вимірювання активної та реактивної потужностей в однофазних та трифазних колах змінного струму, а також для вимірювання, обліку активної та реактивної енергії при двох напрямках і при різних тарифах, для вимірювання частоти мережі, для вимірювання напруги та струму споживача, для вимірювання поточного часу при фіксованій календарній даті з наданням поточного тарифу на електричну енергію.

Електронні лічильники зберігають інформацію про загальну кількість спожитої електроенергії, про спожиту електроенергію за поточні і попередні роки та місяці. Основними блоками типового електронного лічильника є первинний перетворювач потужності на напругу (ППН), перетворювач напруги на частоту (ПНЧ), інтегрувальний пристрій (ІП) на базі мікроконтролера та цифровий відліковий пристрій (дисплей). На вхідні кола напруги та струму перетворювача потужності роздільно подається напруга споживача та струм. Вихідний код інтегрувального пристрою пропорційний до спожитої енергії за відповідний проміжок часу. Результати вимірювання енергії надаються цифровим відліковим пристроєм, а також надходять в систему автоматизованого контролю і обліку електроенергії (АСКОЕ).

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 3

1 Однофазний індукційний лічильник активної електроенергії має такі технічні характеристики: тип - НІК 2102-02 М1; клас точності -1,0; номінальна сила

струму 5 А; робочий інтервал температур від мінус 40 °С до плюс 50 °С; «1кВт·год = 6800 імпульсів»; маса – не більш 1,0 кг.

Показання лічильника наприкінці місяця дорівнюють 6852 кВт·год, а на початку місяця – 1123 кВт·год.

Визначити передатне число лічильника та його номінальну постійну.

Визначити дійсну витрату активної електроенергії за поточний місяць.

2 До споживача із суто активним опором через вимірювальні трансформатори струму і напруги з $k_{IH} = 10/5$ і $k_{UH} = 1000/100$ підключили однофазний лічильник активної енергії з номінальним передатним числом 1200 оборот/кВт·год і амперметр з верхньою границею вимірювання 5 А. Визначити напругу на затискачах споживача, якщо показ амперметра 4,0 А, а диск лічильника зробив 12 обертів за 1 хвилину.

3 Визначити потужність однофазного споживача, який підключений до лічильника активної електричної енергії з номінальним передатним числом 600 обертів/кВт·год, якщо диск лічильника за 45 секунд зробив 15 обертів.

4 Витрата активної енергії споживача зі сталим опором, виміряна лічильником за добу, становить 60 кВт·год. Визначити передаточне число лічильника, якщо диск лічильника за 1 хвилину зробив 55 обертів.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 3

1. За яким аналітичним виразом визначається дійсна витрата активної електроенергії за поточний період при підключенні однофазного індукційного лічильника до однофазного кола змінного струму через вимірювальні трансформатори струму та напруги?

$$1 \quad \Delta W = k_{IH} \cdot (W_{\text{кінець}} - W_{\text{початок}})$$

$$2 \quad \Delta W = k_{IH} \cdot k_{UH} \cdot (W_{\text{кінець}} - W_{\text{початок}})$$

$$3 \quad \Delta W = W_{\text{кінець}} - W_{\text{початок}}$$

$$4 \quad \Delta W = k_{UH} \cdot (W_{\text{кінець}} - W_{\text{початок}})$$

2. Чому прилади обліку електричної енергії необхідно включати до кіл змінного струму через вимірювальні трансформатори струму та напруги?

1 тому що номінальна напруга лічильника дорівнює напрузі мережі живлення, а номінальний струм лічильника дорівнює струму навантаження

2 тому що номінальна напруга лічильника менша, ніж напруга мережі живлення, а номінальний струм лічильника дорівнює струму навантаження

3 тому що номінальна напруга лічильника менша, ніж напруга мережі живлення, а номінальний струм лічильника менший, ніж струм навантаження

4 тому що номінальна напруга лічильника дорівнює напрузі мережі живлення, а номінальний струм лічильника менший, ніж струм навантаження

3. Якими приладами здійснюються вимірювання та облік електричної енергії у колах змінного струму промислової частоти?

1 індукційними лічильниками електроенергії

2 електродинамічними та феродинамічними лічильниками електроенергії

3 електронними лічильниками електроенергії

4 фазометрами

4. За яким аналітичним виразом визначається дійсна витрата активної електроенергії за поточний період при безпосередньому підключенні однофазного індукційного лічильника до однофазного кола змінного струму?

1 $\Delta W = k_{IH} \cdot (W_{кінь} - W_{почат})$

2 $\Delta W = k_{IH} \cdot k_{UH} \cdot (W_{кінь} - W_{почат})$

3 $\Delta W = W_{кінь} - W_{почат}$

4 $\Delta W = k_{UH} \cdot (W_{кінь} - W_{почат})$

5. Визначте номінальну постійну електронного лічильника, $(Вт \cdot с)/імп$, якщо передатне число лічильника дорівнює «1 кВт·год=600 імпульсів».

1 3600

2 1000

3 6000

4 600

6. Визначити величину чутливості електронного лічильника, %, якщо номінальний струм лічильника дорівнює 5 A , а величина мінімального струму, при якому диск лічильника починає робити один оборот, дорівнює $0,04\text{ A}$.

- 1 0,8%
- 2 1,0%
- 3 0,04%
- 4 0,5%

7. Показання однофазного електронного лічильника наприкінці місяця дорівнюють $6800\text{ кВт}\cdot\text{год}$, а на початку місяця – $1110\text{ кВт}\cdot\text{год}$. Визначити дійсну витрату активної електроенергії за поточний місяць.

- 1 $6800\text{ кВт}\cdot\text{год}$
- 2 $5690\text{ кВт}\cdot\text{год}$
- 3 $1110\text{ кВт}\cdot\text{год}$
- 4 $7910\text{ кВт}\cdot\text{год}$

РОЗДІЛ 4.

ВИМІРЮВАННЯ КУТА ЗСУВУ ФАЗ ТА КОЕФІЦІЄНТУ ПОТУЖНОСТІ

4.1 Загальні положення

Фаза характеризує стан гармонічного сигналу у конкретний момент часу. Для синусоїдного сигналу $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ фаза $\omega t + \psi_u$ є лінійною функцією часу, де ψ_u – початкова фаза сигналу.

Фазовим зсувом (зсувом фаз) є модуль різниці початкових фаз двох сигналів, наприклад $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ та $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ однакової частоти

$$\varphi = |\psi_u - \psi_i|. \quad (4.1)$$

У галузі вимірювань електричних і магнітних величин необхідність вимірювання кута зсуву фаз виникає у багатьох випадках:

- між напругою і струмом у колі однофазного споживача змінного струму;
- між вхідними та вихідними напругами і струмами чотирьохполюсників (трансформаторів, підсилювачів та фільтрів);
- між струмами і напругами симетричної трифазної системи.

4.2 Методи і засоби вимірювання кута зсуву фаз та коефіцієнта потужності

Фазовий зсув вимірюють методами *безпосередньої оцінки* та *порівняння* і *опосередковано*, класифікація яких наведена на рисунку 4.1.

Вибір методу вимірювання залежить від частоти, рівня та форми сигналу, необхідної точності вимірювання і виду досліджуваного об'єкта.

Прямі вимірювання кута зсуву фаз або *метод безпосередньої оцінки* реалізують за допомогою спеціальних приладів – *фазометрів*, до яких належать:

- аналогові електромеханічні однофазні та трифазних фазометри;
- аналогові електронні фазометри;
- цифрові фазометри.

Всі фазометри градуйовані у кутових градусах або в радіанах.

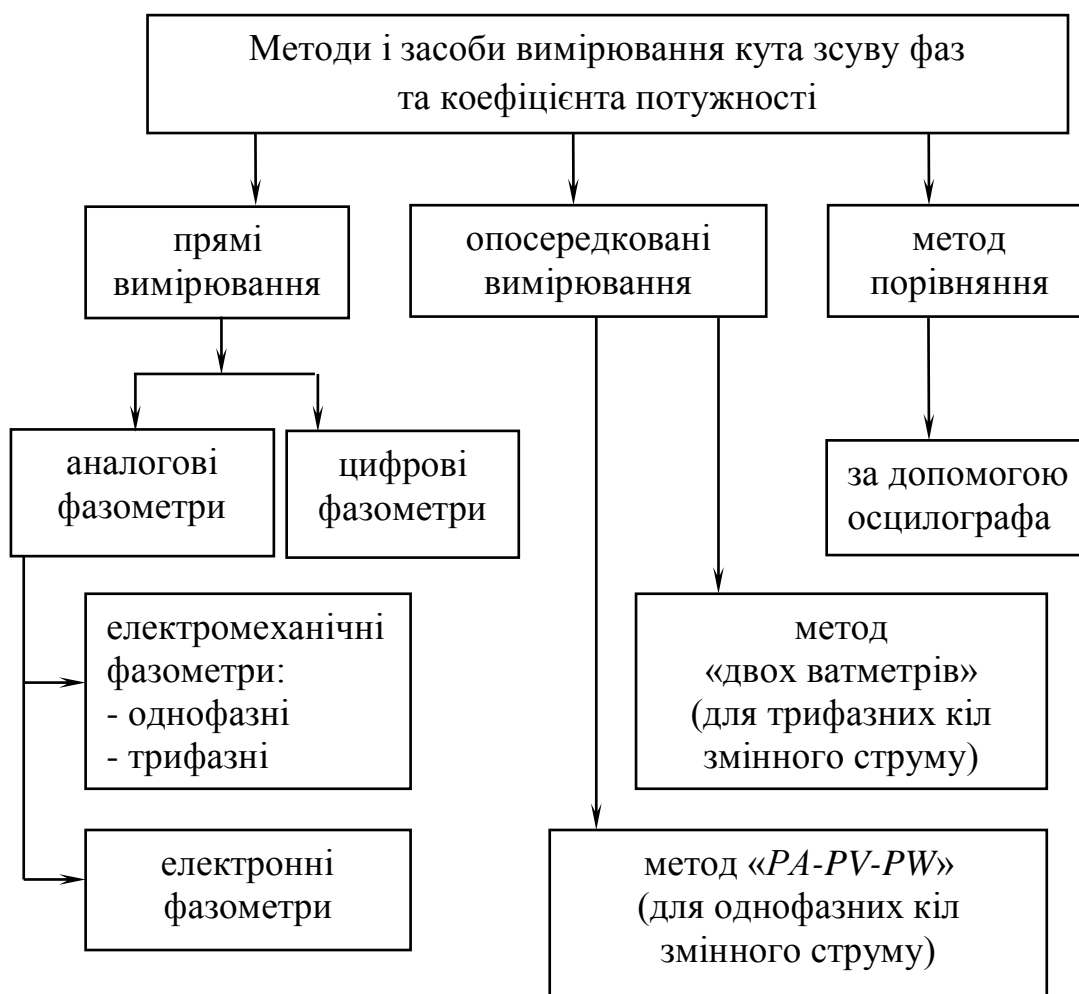


Рисунок 4.1 – Класифікація методів і засобів вимірювання кута зсуву фаз та коефіцієнта потужності

Аналогові електромеханічні фазометри, побудовані на основі логометричних механізмів електродинамічної та електромагнітної систем, застосовують для вимірювання кута зсуву фаз між струмом та напругою однофазних та трифазних споживачів у частотному діапазоні $20 \dots 10000 \text{ Гц}$ при високих рівнях сигналу ($U \leq 600 \text{ В}$) і невисокій точності вимірювання (класи точності 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0). Недоліком таких приладів є велике власне споживання потужності.

Електронні аналогові та цифрові фазометри застосовують для вимірювання кута зсуву фаз між двома гармонічними сигналами (напругами та струмами) у діапазоні частот $1 \text{ Гц} \dots 10 \text{ МГц}$ при низьких рівнях сигналів і високій точності вимірювань (похибка вимірювання $\delta_\varphi \geq \pm 0,1 \%$).

Метод порівняння реалізують за допомогою електронного осцилографа і використовують для вимірювання кута зсуву фаз між двома сигналами однакової частоти у широкому діапазоні частот, який визначається смугою пропускання осцилографа (10 Гц...20 МГц), і при невисокій точності вимірювань.

Відношення активної потужності P споживача до повної потужності S , яке дорівнює косинусу кута зсуву фаз φ між струмом I та напругою U у цьому споживачі, має назву коефіцієнт потужності

$$k_{\varphi} = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi}{U \cdot I}, \quad (4.2)$$

де U та I – середньоквадратичні (діючі) значення напруги та струму.

Слід відзначити, що значення фазового зсуву φ і коефіцієнта потужності $k_{\varphi} = \cos \varphi$ є однозначно визначеними тільки для однофазних і повністю симетричних трифазних кіл змінного струму.

Прилад прямої дії – *фазометр* здатен одночасно вимірювати як значення кута зсуву φ , так й значення коефіцієнта потужності $k_{\varphi} = \cos \varphi$, шкала такого приладу градуйована як в кутових одиницях (від -90° до $+90^{\circ}$), так й в одиницях коефіцієнта потужності (від мінус 1 до плюс 1).

Крім методу безпосередньої оцінки та методу порівняння кут зсуву фаз між напругою та струмом однофазного споживача можна визначати *опосередковано* за допомогою трьох приладів – амперметра, вольтметра, ватметра

$$\varphi = \arccos \frac{P_{PW}}{U_{PV} \cdot I_{PA}}. \quad (4.3)$$

У симетричному трипровідному трифазному колі значення кута зсуву фаз φ та коефіцієнта потужності k_{φ} можна встановити за показами P_{PW1} та P_{PW2} двох ватметрів, які увімкнені за схемою, що наведена на рисунку 2.6 в розділі 2, відповідно до формули (2.9). За такою схемою вимірюється як активна, так й реактивна потужності, а кут зсуву фаз φ визначається за формулою

$$\varphi = \arctg \sqrt{3} \cdot \frac{P_{PW2} - P_{PW1}}{P_{PW1} + P_{PW2}}. \quad (4.4)$$

Слід відзначити, що значення коефіцієнта потужності, розраховане за вище наведеними методами, є *миттєвим* – для моменту часу, коли здійснювалось вимірювання.

Для контролю та аналізу роботи промислових енергосистем в умовах зміни навантаження характерним є *середнє значення коефіцієнта потужності* $k_{\varphi.сер}$ за певний проміжок часу за показами лічильників активної W_a та реактивної W_p енергії

$$k_{\varphi.сер} = \cos \varphi_{сер} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_p}{W_a}\right)^2}}. \quad (4.5)$$

Розглянемо аналогові електромеханічні фазометри більш детально.

Схема електродинамічного фазометра на основі логометричного механізму наведена на рисунку 4.2. В основі приладу – електродинамічний логометр, рухомі рамки 2 та 3 якого скріплені під кутом 60° . В рамці 2 струм I_2 збігається за фазою з напругою на навантаженні U .

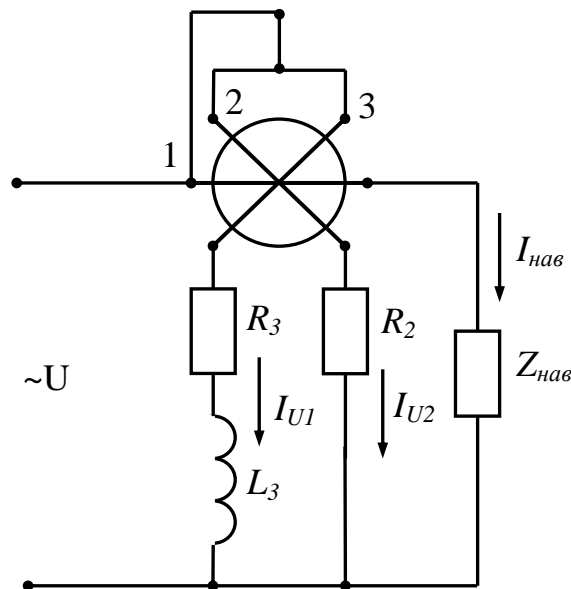


Рисунок 4.2 – Схема електродинамічного фазометра

В електродинамічному фазометрі кут повороту рухомої частин α не залежить від струму та напруги, а є лінійною функцією відношення проєкцій векто-

рів струмів в рухомих котушках на вектор струму в нерухомій котушці згідно функції перетворення

$$\alpha = f\left(\frac{I_3 \cos(\beta - \varphi)}{I_2 \cos \varphi}\right). \quad (4.6)$$

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.

На рисунку 4.3 наведена схема увімкнення трифазного одноелементного електродинамічного фазометра до трифазного кола змінного струму.

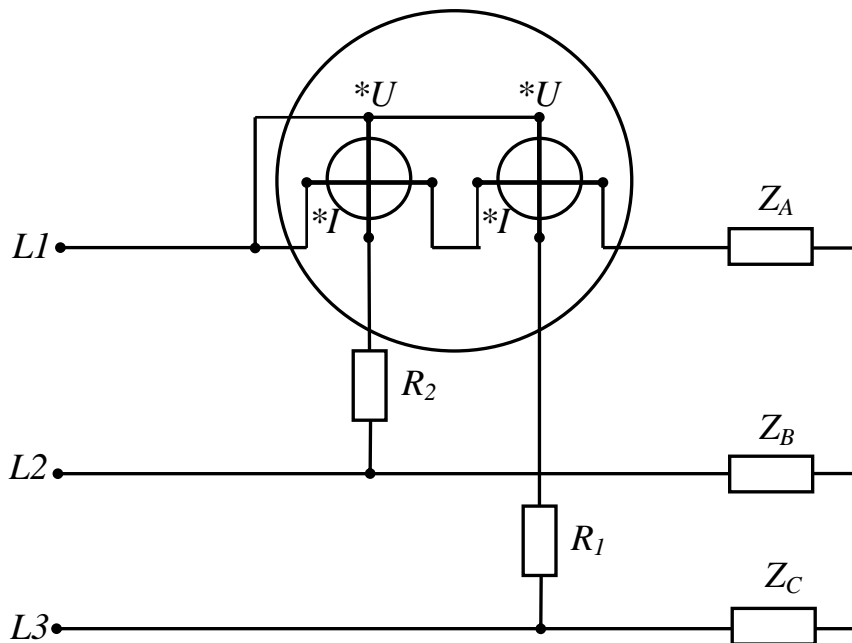


Рисунок 4.3 - Схема увімкнення трифазного одноелементного електродинамічного фазометра до трифазного кола змінного струму

Секції нерухомої частини вимірювального механізму увімкнені послідовно в коло струму фази A , а секції рухомої частини через резистори R_1 та R_2 увімкнені на лінійні напруги U_{AC} та U_{AB} . Таким чином, на секції рухомої частини вимірювального механізму діють два обертальні моменти

$$M_{об.1} = k_1 \cdot I_A \cdot \frac{U_{AC}}{R_2} \sin \alpha \cdot \cos \left(\widehat{U_{AC} I_A} \right); \quad (4.7)$$

$$M_{об.2} = k_2 \cdot I_A \cdot \frac{U_{AB}}{R_1} \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos(\widehat{U_{AB} I_A}), \quad (4.8)$$

де I_A , U_{AB} , U_{AC} – середньоквадратичні (діючі) значення фазового струму фази A та відповідних лінійних напруг;

α – кут повороту рухомої частини;

β – просторовий кут між площинами секцій рухомої частини.

У момент рівноваги $M_{об1} = M_{об2}$, та за умови повної симетрії трифазного кола (кут $\beta = \frac{2 \cdot \pi}{3}$) отримуємо рівняння шкали фазометра

$$\alpha = \frac{\pi}{3} + \varphi, \quad (4.9)$$

тобто між кутом повороту α рухомої частини вимірювального механізму і вимірюваним кутом зсуву фаз φ між фазними струмами і напругами трифазного споживача є лінійна залежність і шкала фазометра є лінійною (рівномірною).

Трифазні електромагнітні фазометри використовуються для вимірювання коефіцієнта потужності в трифазних електромережах при симетричному навантаженні. Прилади вмикаються до трифазного кола безпосередньо та через вимірювальний трансформатор струму.

На рисунку 4.4 наведена схема увімкнення трифазного електромагнітного фазометра до трифазного кола змінного струму. В конструкції приладу є три нерухомі котушки, які на рисунку позначені цифрами 1, 2, 3. Котушки 1 та 2 є котушками струму та виконані двохсекційними, а між ними розміщена рухома частина приладу у вигляді осердя, який за формою нагадує літеру Z , який обертається на осі та зв'язаний зі стрілочним покажчиком. Секції котушок мають просторове розташування відносно одна одної під кутом 60° . У коло котушки 3 (котушка напруги) увімкнений додатковий резистор R . Котушка напруги 3 створює магнітне поле, яке пульсує, лінії якого замикаються через осердя. Котушки струму 1 та 2 створюють магнітне поле, яке обертається.

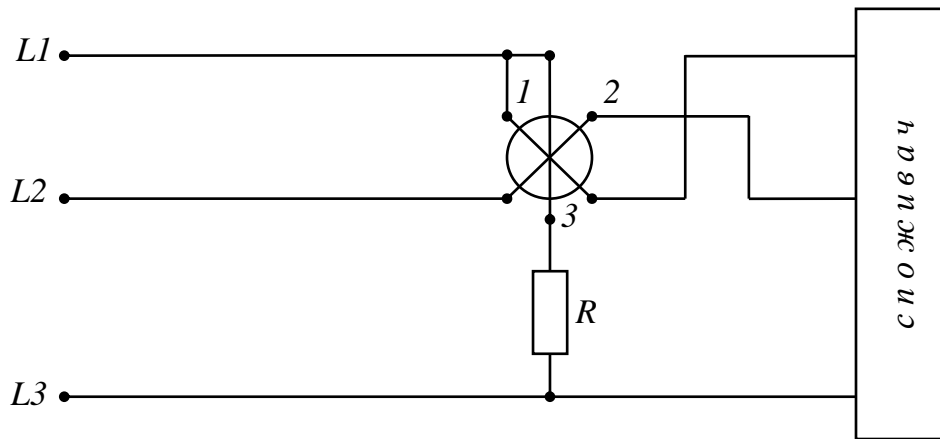


Рисунок 4.4 - Схема увімкнення трифазного електромагнітного фазометра до трифазного кола змінного струму

Під впливом такого магнітного поля осердя займає положення, при якому енергія магнітного поля буде максимальною. Це відповідає положенню осердя у напрямку вектора магнітної індукції магнітного поля, яке обертається, в момент максимуму індукції поля, що пульсує. Різним фазним кутам зсуву струму відносно напруги відповідають просторові положення осі поля, що обертається, в момент максимуму поля, різними є й положення осердя. За значенням кута повороту рухомої частини визначають фазний кут зсуву у колі трифазного кола.

Розглянемо *аналогові електронні фазометри*, які застосовують для вимірювання кута зсуву фаз між двома напругами $u_1(t) = U_{m1} \sin \omega t$ та $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi)$, тому то вони є двоканальними.

На рисунку 4.5 наведена структурна схема аналогового електронного фазометра, основою роботи якого є принцип перетворення кута зсуву фаз між напругами $u_1(t)$ та $u_2(t)$ в прямокутні імпульси струму. Напруги, що досліджуються, $u_1(t)$ та $u_2(t)$ однакової частоти, зміщені за фазою на кут φ , надходять на два ідентичні канали, кожен з яких складається з вхідного підсилювача – обмежувача та формувача прямокутних імпульсів.

На виходах формувачів строюються прямокутні імпульси $U_{П1}$ та $U_{П2}$ однакової амплітуди U_m і тривалості $T/2$, зміщені у часі на проміжок Δt , який пропорційний до вимірюваного кута зсуву фаз φ . Прямокутні імпульси $U_{П1}$ та $U_{П2}$ своїми передніми та задніми фронтами керують роботою формувача прямокут-

них імпульсів – тригера 3, на виході якого створюється послідовність імпульсів струму $I_{ПЗ}$ з амплітудою I_m , тривалістю Δt і періодом $T/2$.

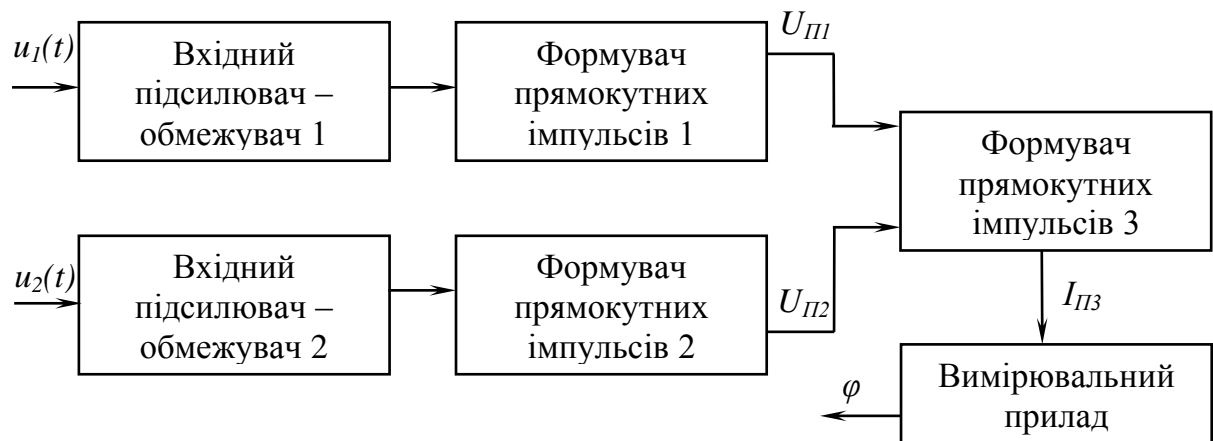


Рисунок 4.5 - Структурна схема аналогового електронного фазометра

У вихідне коло формувача 3 увімкнений аналоговий вимірювальний прилад – магнітоелектричний міліамперметр, покази якого пропорційні до середнього значення струму I_0 за період T

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T I_{ПЗ} dt = \frac{2 \cdot \Delta t}{T} \cdot I_m. \quad (4.10)$$

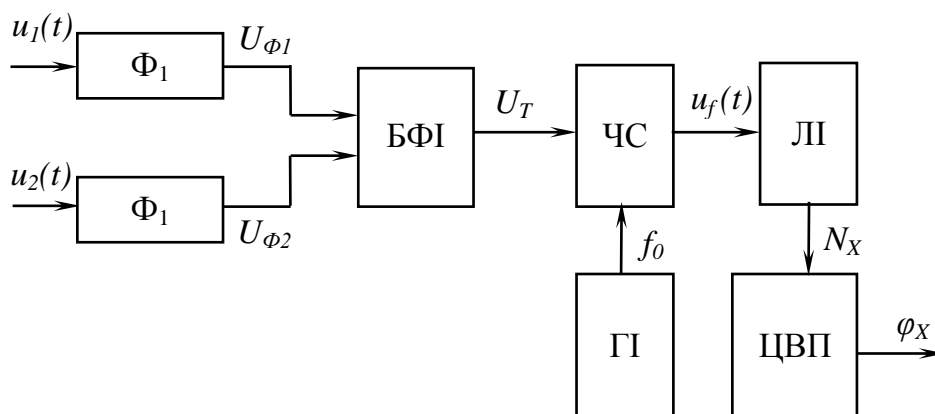
Так як, $\varphi = \omega \cdot \Delta t$ і $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$, то отримуємо вираз, який пов'язує вимірюваний кут φ з середнім значенням струму I_0 , тобто з показом міліамперметром

$$\varphi = 360 \cdot \frac{\Delta t}{T} = \frac{180}{I_m} \cdot I_0 = k \cdot I_0. \quad (4.11)$$

Тому то шкала міліамперметра, що градуйована безпосередньо в градусах, є лінійною і залежить від частоти та рівнів сигналів, кут зсуву фаз між якими вимірюється. Слід відзначити, що перевагами аналогових електронних приладів порівняно з електромеханічними є широкий частотний діапазон (1 Гц...10 МГц), широкий рівень вхідних сигналів (0,01...200 В), а також можливість вимірювання кута зсуву фаз між двома сигналами.

Істотними перевагами цифрових вимірювальних приладів над аналоговими є висока точність, широкий діапазон вимірювання, можливість безпосереднього використання результатів вимірювання для керування технологічними процесами призвели до появи *цифрових фазометрів*. Це прилади, які призначені для вимірювання кута зсуву фаз між двома синусоїдними напругами однакової частоти.

На рисунку 4.6 наведена структурна схема цифрового фазометра, призначення якого – це вимірювання миттєвого значення фазового зсуву φ_X між сигналами $u_1(t)$ та $u_2(t)$.



Φ_1, Φ_2 – формувачі прямокутних імпульсів; БФІ – блок формування імпульсу;

ЧС – часовий селектор; ЛІ – лічильник імпульсів;

ГІ – генератора лічильних імпульсів; ЦВП – цифровий відліковий пристрій

Рисунок 4.6 – Структурна схема цифрового фазометра

В момент переходу кривих $u_1(t)$ та $u_2(t)$ через нуль формувачі Φ_1 та Φ_2 формують короткі прямокутні імпульси $U_{\phi 1}$ і $U_{\phi 2}$, які відкривають і закривають блок формування імпульсів БФІ. Часовий селектор ЧС упродовж часу t_X пропускає лічильні імпульси частотою f_0 від генератора імпульсів ГІ на лічильник імпульсів ЛІ та цифровий відліковий пристрій ЦВП. Кількість імпульсів N_X , що надійшли на лічильник, дорівнює

$$N_X = \frac{t_X}{T_0} = t_X \cdot f_0. \quad (4.12)$$

Так як фазовий зсув φ_X гармонічних коливань визначається як

$$\varphi_X = \frac{2 \cdot \pi \cdot t_X}{T_X}, \quad (4.13)$$

де T_X - період коливань; $T_X = 1/f_X$;

t_X - часовий зсув між коливаннями $u_1(t)$ та $u_2(t)$, тоді з врахуванням формули (4.13)

$$\varphi_X = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_X \cdot N_X}{f_0} = k_\varphi \cdot N_X, \quad (4.14)$$

де k_φ - коефіцієнт перетворення фазометра.

Так як за формулою (4.14) для визначення φ_X необхідно знати значення частоти f_X , тому то в одному приладі суміщають функції частотоміра та фазометра: спочатку виконується цикл вимірювання періоду сигналу T_X і визначення частоти f_X , а потім виконується цикл вимірювання зсуву фаз φ_X .

У сучасних цифрових фазометрах результат вимірювання подається безпосередньо в електричних градусах з урахуванням знака фазового кута, а границі допустимої основної похибки, яка також виражена в електричних градусах, визначають за одночленною або двочленною формулами

$$\Delta_{\varphi, \text{сп}} = \pm a^0; \quad \Delta_{\varphi, \text{сп}} = \pm (a + b\varphi_X)^0. \quad (4.15)$$

Наприклад, границя допустимої основної похибки фазометра Ф2-16 дорівнює $\pm (0,2 + 0,004 \cdot \varphi_X)^0$, а для фазометра Ф5126 границя допустимої основної похибки фазометра дорівнює $\pm 0,3^0$.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 4

1 При вимірюванні потужності у симетричному трифазному колі за методом двох ватметрів були отримані покази ватметрів $P_{PW1} = 35 \text{ Вт}$ і $P_{PW2} = 95 \text{ Вт}$. Визначити кут зсуву фаз між струмом та напругою.

2 Записати результат вимірювання кута зсуву фаз між струмом і напругою однофазного споживача за допомогою фазометра, метрологічні характеристики якого такі: клас точності 0,2; діапазон вимірювання від мінус 130^0 до 0^0 та від 0^0

до плюс 130° ; номінальні значення струму 5 та 10 A ; напруги 100; 127; 220 V ; частоти 50 $Гц$, якщо його показ $\varphi = +60^{\circ}$, а експеримент здійснено при температурі 10 $^{\circ}C$.

3 Записати результат вимірювання кута зсуву фаз між струмом і напругою однофазного споживача за допомогою фазометра, метрологічні характеристики якого такі: клас точності 1,5; діапазон вимірювання від мінус 90° до 0° та від 0° до плюс 90° ; номінальні значення струму 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,5; 5 та 100 A ; напруги 100; 127; 220 V ; частоти 50 $Гц$, якщо його показ $\varphi = +45^{\circ}$, а експеримент здійснено за нормальних умов.

4 Визначити відносну похибку вимірювання кута зсуву $\varphi = 90^{\circ}$ між напругою і струмом однофазного споживача змінного струму фазометром, метрологічні характеристики якого такі: клас точності $\pm(0,2 + 0,004 \cdot \varphi_x)$; діапазон вимірювання від 0° та $\pm 180^{\circ}$; частотний діапазон від 20 $Гц$ до 2 $МГц$. Експеримент здійснено за нормальних умов.

5 На електростанції встановлені електронні лічильники активної і реактивної енергії. За час роботи споживачів показання лічильників збільшилися відповідно на 220 000 $kWh \cdot год$ та на 68 000 $kVar \cdot год$. Визначити середнє значення коефіцієнта потужності.

6 В однофазному колі змінного струму за даними опосередкованих вимірювань за допомогою трьох приладів були отримані такі показання: амперметр - 3,5 A , вольтметр – 145 V , ватметр – 95 $Вт$. Визначити кут зсуву фаз між напругою та струмом.

7 Для задачі 6 розробіть схему включення трьох приладів до однофазного кола змінного струму для вимірювання кута зсуву фаз між напругою та струмом.

8 Опишіть конструкцію електродинамічного фазометра та наведіть схему увімкнення його до однофазного кола змінного струму.

9 Як вимірювати кут зсуву фаз електронним осцилографом? Які переваги осцилографічного методу вимірювання?

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Оберіть три вірні відповіді.

За допомогою яких приладів реалізуються прямі вимірювання кута зсуву фаз та коефіцієнта потужності?

- 1 аналогові електромеханічні частотоміри
- 2 аналогові електромеханічні однофазні та трифазні фазометри
- 3 аналогові електронні фазометри
- 4 цифрові вольтметри
- 5 електронні лічильники
- 6 цифрові фазометри

2. За яким опосередкованим методом вимірюється кут зсуву фаз у симетричному три провідному колі змінного струму?

- 1 за методом трьох амперметрів
- 2 за методом амперметра, вольтметра, ватметра
- 3 за методом двох ватметрів
- 4 за методом фазометра

3. Яким фазометрам притаманні висока точність, широкий діапазон вимірювання, можливість безпосереднього використання результатів вимірювання для керування процесами виробництва?

- 1 електронним фазометрам
- 2 електромеханічним аналоговим фазометрам
- 3 цифровим фазометрам

4. За яким аналітичним виразом визначається величина коефіцієнту потужності за методом амперметра, вольтметра та ватметра?

$$1 \quad \varphi = \arctg \sqrt{3} \cdot \frac{P_{PW2} - P_{PW1}}{P_{PW1} + P_{PW2}}$$

$$3 \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$2 \quad \cos \varphi = \frac{P_{PW}}{U_{PV} \cdot I_{PA}}$$

$$4 \quad k_{\varphi, \text{cep}} = \cos \varphi_{\text{cep}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_P}{W_a}\right)^2}}$$

РОЗДІЛ 5. ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ

5.1 Загальні положення

Найважливішими параметрами періодичного сигналу $x(t)$, які характеризують його повторюваність в часі, є *циклічна частота* f , *колова частота* ω і *період* T .

Період T – це інтервал часу, протягом якого повторюються миттєві значення періодичного сигналу.

Кількість повних циклів (періодів) зміни сигналу за одиницю часу – це *циклічна частота* або просто *частота* f , яка є оберненою величиною до періоду T : $f = 1/T$. Так як фаза гармонічного сигналу змінюється за лінійним законом, то його частота є сталою величиною

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \text{const.} \quad (5.1)$$

Одиниця частоти *герц* визначається як одне коливання за одну секунду. Частота і час пов'язані між собою, тому вимірювання таких величин залежать від умов експерименту та необхідною точністю вимірювання. Діапазон вимірювання частоти в галузі вимірювань електричних і магнітних величин широкий – від часток *Гц* до тисяч *МГц*, тобто від інфранизьких до надвисоких частот.

5.2 Методи і засоби вимірювання частоти

Частоту вимірюють спеціальними приладами – *частотомірами*, на основі метода безпосередньої оцінки і методами порівняння, класифікація яких наведена на рисунку 5.1. Методи безпосередньої оцінки реалізують за допомогою аналогових електромеханічних і електронних та цифрових частотомірів.

Аналогові електромеханічні частотоміри електромагнітної, електродинамічної та феродинамічної систем застосовують для вимірювання частоти у промислових умовах в діапазоні $20 \dots 2500$ *Гц* з невисокою точністю (класи точності приладів 0,2; 0,5; 1,5; 2,5).

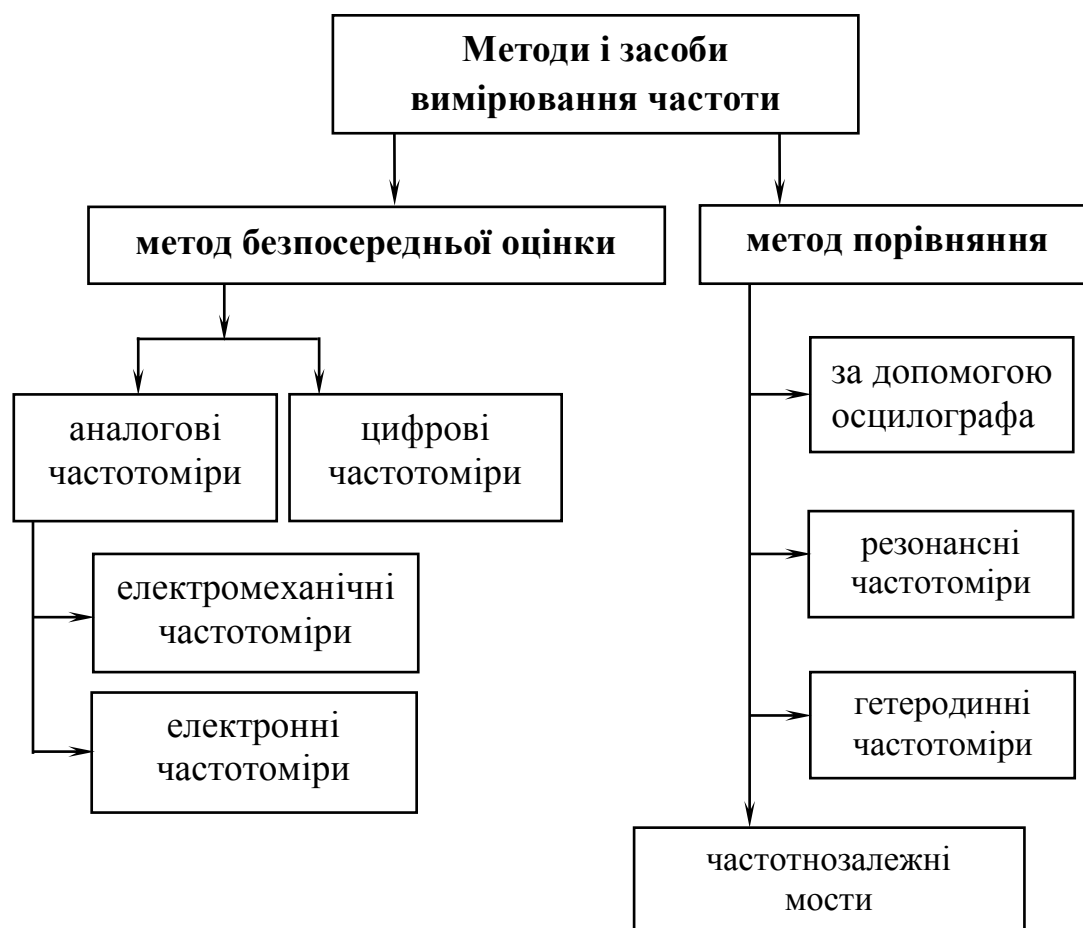


Рисунок 5.1 – Класифікація методів і засобів вимірювання частоти

Недоліком електромеханічних частотомірів є велике власне споживання потужності і залежність показів від впливу зовнішніх факторів, наприклад, вібрацій.

Аналогові електронні (конденсаторні) частотоміри використовують для вимірювання частоти періодичних сигналів у діапазоні $10 \text{ Гц} \dots 500 \text{ кГц}$ при регулюванні електро- та радіовимірювальної апаратури, класи точності таких приладів 0,2; 0,5; 1,0; 1,5.

Цифрові частотоміри призначені для високоточних вимірювань частоти гармонічних та імпульсних періодичних сигналів у діапазоні $10 \text{ Гц} \dots 10 \text{ ГГц}$, а також для вимірювання відношення частот двох сигналів, періоду та часових інтервалів у діапазоні $10^{-9} \dots 10^5 \text{ с}$. Мінімально можливе значення похибки частоти та часових інтервалів становить $\pm 10^{-7} \%$.

Вимірювання частоти *методом порівняння* полягає у порівнянні вимірюваної частоти f_X з точно відомою частотою f_N , а рівність частот $f_X = f_N$ або кратність частот f_X/f_N визначають індикаторами рівноваги – електронними осцилографами, частотнозалежними мостами і резонансними частотомірами.

Осцилографічний метод застосовують для вимірювання частоти неперервних та імпульсних періодичних сигналів у діапазоні 10 Гц...20 МГц, який визначається смугою пропускання електронно-променевої трубки.

Частотнозалежні мости змінного струму забезпечують вимірювання частоти в звуковому діапазоні від 20 Гц до 20 кГц.

Гетеродинні та резонансні частотоміри використовують для вимірювання частоти неперервних, амплітудно-модульованих та імпульсно-модульованих сигналів у діапазоні 50 кГц...20 ГГц у галузі радіотехнічних вимірювань.

Розглянемо аналогові електромеханічні частотоміри більш детально. Основою конструкції таких частотомірів є логометричні механізми електродинамічної, феродинамічної та електромагнітної систем, вітки яких містять два частотнозалежні кола з різною функціональною залежністю їх параметрів від частоти. На рисунку 5.2 наведена схема електродинамічного частотоміра, а на рисунку 5.3 – схема електромагнітного частотоміра.

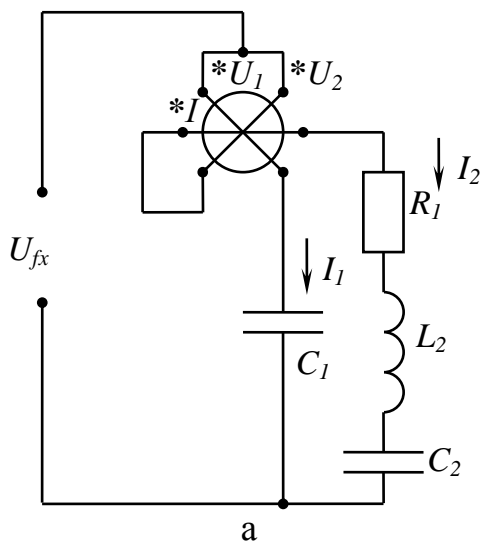


Рисунок 5.2 – Схема електродинамічного частотоміра

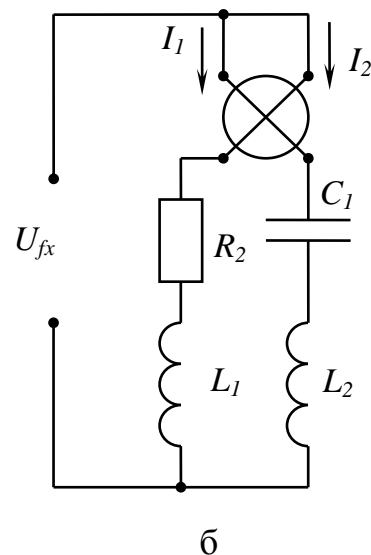


Рисунок 5.3 – Схема електромагнітного частотоміра

Принцип дії *електродинамічного частотоміра* оснований на залежності кута зсуву фаз струму I_1 щодо напруги U_{fX} від частоти сигналу f_X . Параметри елементів R_1 , L_1 і C_1 підібрані так, що частота резонансу напруг послідовного контуру дорівнює середній частоті діапазону вимірювання

$$f_{рез} = f_{сер} = (f_{поч} + f_{кінц}) \cdot 0,5, \quad (5.2)$$

де $f_{поч}$, $f_{кінц}$ – початкове і кінцеве значення діапазону вимірювання частоти.

У момент резонансу струм I_1 збігається з напругою U_{fX} , зсув фаз між струмами I_1 та I_2 у рамках логометра дорівнює 90^0 , внаслідок чого показчик приладу встановиться посередині шкали. При відхиленні частоти f_X від $f_{сер}$ буде змінюватися кут φ між струмом I_1 та напругою U_{fX} і відповідно, показ приладу. Шкала приладу проградуєвана в $Гц$.

У схемі *електромагнітного частотоміра* значення струмів I_1 та I_2 в колах логометра по-різному залежать від частоти f_X . Параметри кіл логометра підібрані так, що на середній частоті $f_X = f_{сер}$ діапазону вимірювання $f_{почат} \dots f_{кінц}$ струми I_1 та I_2 дорівнюють один одному і вказівник приладу займає положення посередині шкали. Вимірним значенням частоти f_X відповідають відповідні кути відхилення рухомої частини приладу в залежності від значення струмів I_1 та I_2 .

Електродинамічні та електромагнітні частотоміри мають вузький діапазон вимірювання, наприклад, $45 \dots 55 Гц$, невисокі класи точності – 0,5; 1,0; 1,5; 2,5, і велике власне споживання потужності – $10 Вт$, але завдяки простоті конструкції і високій надійності такі прилади широке застосування в енергетичних системах для вимірювання промислової частоти.

Границя основної похибки аналогових частотомірів виражена у формі зведеної похибки, яка чисельно дорівнює класу точності

$$\gamma_{PHz.зр} = \pm \frac{\Delta_{PHz.зр}}{f_N} \cdot 100\%, \quad (5.3)$$

де $\Delta_{PHz.зр}$ – границя основної абсолютної похибки частотоміра, $Гц$;

f_N – нормувальне значення, $Гц$.

Частотоміри належать до одного із класів точності: 0,02; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5, а нормувальне значення f_N дорівнює верхній границі діапазону вимірювання $f_{кінц}$.

В частотомірах нормувальне значення може бути виражене таким способом:

- у частотомірів з вузьким діапазоном вимірювання нормувальне значення f_N дорівнює різниці кінцевого $f_{кінц}$ і початкового $f_{поч}$ значень діапазону вимірювання $f_N = f_{кінц} - f_{поч}$, Гц. Наприклад, для частотоміра Д146 з діапазоном вимірювання 45...55 Гц нормувальне значення $f_N = 55 - 45 = 10$ Гц;

- у частотомірів з встановленим номінальним значенням частоти f_H нормувальне значення дорівнює цьому номінальному значенню, тобто $f_N = f_H$, Гц. Наприклад, для частотоміра В-80 з діапазоном вимірювання 48...52 Гц і номінальним значенням частоти $f_H = 50$ Гц нормувальне значення $f_N = 50$ Гц.

Спосіб встановлення нормувального значення f_N для кожного конкретного частотоміра вказується в паспорті чи нормативно-технічній документації на частотомір. У зв'язку з цим граничне значення відносної похибки показу $f_{вим}$ частотоміра дорівнює

$$\delta_{PHz.zp} = \pm \gamma_{PHz.zp} \frac{f_N}{f_{вим}} \cdot 100\%. \quad (5.4)$$

Значення відносної похибки показу $f_{вим}$ може бути не тільки більшим, але, й, на відміну від інших аналогових приладів, меншим від класу точності частотоміра $\gamma_{PHz.zp}$.

Принцип дії *цифрового частотоміра*, структурна схема якого наведена на рисунку 5.4, оснований на підрахуванні кількості періодів T_X невідомої частоти f_X за відомий інтервал часу T_B . Сигнал U_{fx} невідомої частоти f_X через вхідний блок *ВБ* надходить на формувач Φ , який перетворює його в послідовність імпульсів з періодом T_X .

Для формування часового інтервалу T_B використовується кварцовий генератор імпульсів *ГІ*, подільник частоти *ПЧ* та блок формування імпульсів *БФІ*, на виході якого формується прямокутний імпульс.

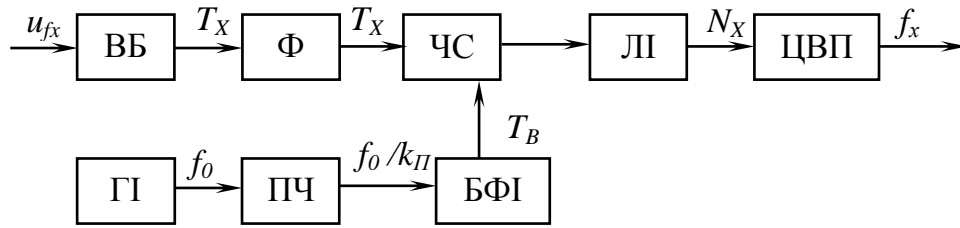


Рисунок 5.4 - Структурна схема цифрового частотоміра

Тривалість прямокутного імпульсу з блоку формування імпульсів *БФІ* дорівнює

$$T_B = \frac{1}{f_0} = \frac{k_{П}}{f_0}, \quad (5.5)$$

де f_0 – коефіцієнт поділу частоти подільника напруги *ПЧ*.

Часовий селектор *ЧС* (ключ) упродовж часу T_B пропускає імпульси частотою f_x лічильник імпульсів *ЛІ* і цифровий відліковий пристрій *ЦВП*. Кількість імпульсів N_x , що надійшли на лічильник, дорівнює

$$N_B = \frac{T_B}{T_x} = T_B \cdot f_x. \quad (5.6)$$

Вимірювана частота f_x визначається

$$f_x = \frac{N_x}{T_B}. \quad (5.7)$$

Граничне значення відносної похибки вимірювання частоти знаходять за формулою

$$\delta_{f_x} = \pm(\delta_{f_0} + \delta_{KB}) \cdot 100\%, \quad (5.8)$$

де δ_{f_0} – відносна похибка нестабільності частоти f_0 генератора лічильних імпульсів;

δ_{KB} – відносна похибка квантування, яка визначається за виразом

$$\delta_{KB} = \pm \frac{1}{N_x} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_B}. \quad (5.9)$$

Принцип дії цифрового частотоміра у режимі «вимірювання періоду», структурна схема якого наведена на рисунку 5.5, оснований на підрахунку кіль-

кості періодів відомої частоти f_0 за інтервал часу, який дорівнює вимірюваному періоду T_X .

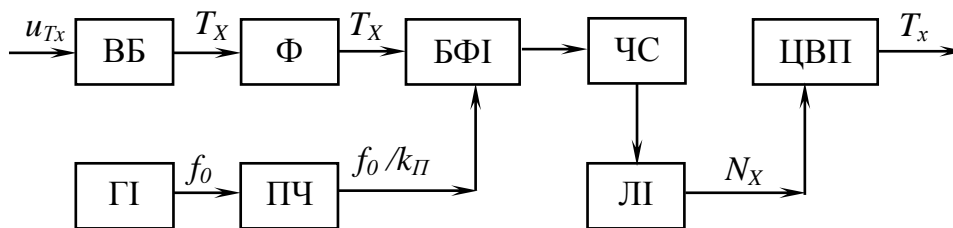


Рисунок 5.5 - Структурна схема цифрового частотоміра у режимі «вимірювання періоду»

Кількість імпульсів N_X , що надійшли на лічильник $ЛІ$, пропорційна до вимірюваного періоду T_X

$$N_X = T_X \cdot \frac{f_0}{k_{П}} = \frac{T_X \cdot f_0}{k_{П}}. \quad (5.10)$$

Для підвищення точності вимірювання періоду кількість лічильних імпульсів N_X підраховують не за один період T_X , а за декілька, тобто здійснюється розширення часу вимірювання за допомогою подільника частоти вхідного сигналу. Значення вимірюваного періоду T_X визначається за формулою

$$T_X = \frac{N_X \cdot k_{П}}{n \cdot f_0}, \quad (5.11)$$

де n – коефіцієнт розширення, який дорівнює кількості вимірюваних періодів T_X , що становить час вимірювання.

Сучасні цифрові частотоміри – це багатофункціональні прилади, які містять мікропроцесор, призначення якого це обробка сигналів калібрування, керування усім частотоміром. Такі частотоміри вимірюють частоту від сотих частот $Гц$ до сотень $МГц$, інтервали часу, періодів та відношення частот. Швидкодія лічильників імпульсів дає змогу вимірювати частоту до $1 Гц$ з відносною похибкою $\pm 10^{-7} \%$.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 5

1 Визначити відносну похибку вимірювання частоти $f_X = 100 \text{ кГц}$ цифровим частотоміром, в якого відносна похибка δ_{f_0} частоти генератора імпульсів не перевищує $\pm 5 \cdot 10^{-8}$, а час вимірювання дорівнює $T_B = 1 \text{ с}$.

2 Визначити крок квантування Δf_{KB} цифрового частотоміра і відносну похибку квантування $\delta_{KB,гр}$, якщо його показ $560,7 \text{ Гц}$.

3 При вимірюванні частоти сигналу частотоміром класу точності 0,5 в діапазоні $0 \dots 1000 \text{ Гц}$ одержано показ 500 Гц . Записати результат вимірювання, якщо експеримент виконано при температурі $\Theta = 12^0\text{C}$ і напруженості зовнішнього магнітного поля $H = 400 \text{ А/м}$.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Оберіть три вірні відповіді.

За допомогою яких приладів реалізується метод безпосередньої оцінки?

- 1 аналогові електромеханічні частотоміри
- 2 цифрові частотоміри
- 3 аналогові електронні частотоміри
- 4 резонансні частотоміри
- 5 гетеродинні частотоміри
- 6 частотнозалежні вимірювальні мости

2. Які частотоміри застосовуються для вимірювання частоти у промислових умовах в діапазоні $20 \dots 2500 \text{ Гц}$?

- 1 аналогові електронні частотоміри
- 2 цифрові частотоміри
- 3 резонансні частотоміри
- 4 аналогові електромеханічні частотоміри

3. Які частотоміри застосовуються для вимірювання частоти періодичних сигналів у діапазоні $10 \text{ Гц} \dots 500 \text{ кГц}$?

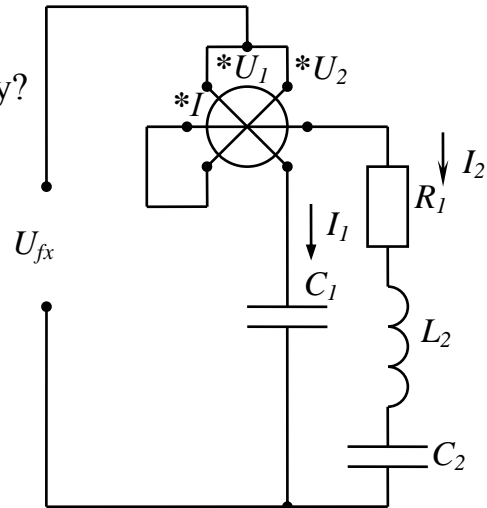
- 1 аналогові електронні частотоміри
- 2 цифрові частотоміри
- 3 резонансні частотоміри
- 4 аналогові електромеханічні частотоміри

4. Які частотоміри призначені для високочотних вимірювань частоти гармонічних та імпульсних періодичних сигналів у діапазоні $10 \text{ Гц} \dots 10 \text{ ГГц}$?

- 1 аналогові електронні частотоміри
- 2 цифрові частотоміри
- 3 резонансні частотоміри
- 4 аналогові електромеханічні частотоміри

5. Схема якого частотоміра наведена на рисунку?

- 1 електромагнітного частотоміра
- 2 цифрового частотоміра
- 3 резонансного частотоміра
- 4 електродинамічного частотоміра



6. Оберіть дві вірні відповіді.

Які частотоміри використовують для вимірювання частоти неперервних, амплітудно-модульованих сигналів у діапазоні $50 \text{ кГц} \dots 20 \text{ ГГц}$?

- 1 аналогові електронні частотоміри
- 2 цифрові частотоміри
- 3 резонансні частотоміри
- 4 аналогові електромеханічні частотоміри
- 5 гетеродинні частотоміри

7. Принцип дії якого частотоміра оснований на залежності кута зсуву струму щодо напруги від частоти сигналу?

- 1 електродинамічного частотоміра
- 2 електромагнітного частотоміра
- 3 цифрового частотоміра
- 4 аналогові електронні частотоміри

8. Принцип дії якого частотоміра оснований на підрахуванні кількості періодів невідомої частоти за відомий інтервал часу?

- 1 електромагнітного частотоміра
- 2 цифрового частотоміра
- 3 резонансного частотоміра
- 4 електродинамічного частотоміра

РОЗДІЛ 6.

ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ В КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

6.1 Загальні положення про вимірювання електричного опору

У сучасній практиці доводиться вимірювати електричний опір у дуже широкому діапазоні значень – від наноом до значень близько 10^{17} Ом і більше.

Існують різні вимоги до точності вимірювань. Для вимірювання з порівняно невисокою точністю використовують прилади прямого перетворення, точні вимірювання здійснюють за допомогою вимірювальних мостів, компенсаторів постійного струму та цифрових приладів.

Методи вимірювань опорів поділяють на дві групи – *прямі* та *опосередковані*.

Для *прямих вимірювань* опорів у діапазоні від 10^{-5} до 10^9 Ом використовують магнітоелектричні омметри та мегомметри, а для більших опорів (до $10^{14} \dots 10^{17}$ Ом) – електронні мегомметри та тераомметри, а також вимірювальні мости постійного струму (одинарних і подвійних) та цифрові омметри.

Опосередковані вимірювання здійснюється методом амперметра і вольтметра та за допомогою компенсаторів постійного струму і компараторів напруг.

Залежно від границь вимірювань всі омметри розділяють на такі групи: *мікроомметри*, нижня границя яких дорівнює 10^{-5} Ом; *міліомметри*, нижня границя яких дорівнює 10^{-3} Ом; *омметри*, нижня границя яких дорівнює 10 тОм; *кілоомметри*, верхня границя яких дорівнює 1 МОм; *мегаомметри*, верхня границя яких дорівнює 1000 МОм; *тераомметри*, верхня границя яких дорівнює більш, ніж 10^9 Ом.

Залежно від принципу дії аналогові омметри поділяють на три групи: *омметри з магнітоелектричним вимірювальним механізмом*, *омметри з логометричним вимірювальним механізмом* та *електронні аналогові омметри*.

Діапазони вимірювань та засоби вимірювань електричного опору наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Діапазони і засоби вимірювань електричного опору

Вид вимірювання	Засоби вимірювальної техніки	Діапазон вимірювань, Ом	Найменша відносна похибка вимірювання, %, яка відповідає		
			нижній границі діапазону вимірювання	середньому значенню діапазону вимірювання	верхній границі діапазону вимірювання
Прямі	мости одинарні	$10^{-4} \dots 10^{16}$	$\pm 1,0$	$\pm 0,005$	± 10
	мости подвійні	$10^{-8} \dots 10^2$	$\pm 2,0$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
	омметри магнітоелектричні	$10^{-3} \dots 10^7$	$\pm 3,0$	$\pm 1,0$	$\pm 4,0$
	омметри магнітоелектричні логометричні	$10^2 \dots 10^9$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 5,0$
	омметри аналогові електронні	$10^{-8} \dots 10^{17}$	$\pm 4,0$	$\pm 0,5$	± 10
	омметри цифрові	$10^{-3} \dots 10^{12}$	$\pm 0,05$	$\pm 0,005$	$\pm 2,0$
Опосередковані	амперметри і вольтметри	$10^{-5} \dots 10^{10}$ (для аналогових)	$\pm 1,0$	$\pm 0,2$	$\pm 1,0$
		$10^{-6} \dots 10^{13}$ (для цифрових)	$\pm 0,1$	$\pm 0,015$	$\pm 1,0$
	компенсатори постійного струму та компаратори напруги	$10^{-6} \dots 10^9$	$\pm 1,0$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$

Цифрові омметри входять до складу комбінованих цифрових вимірювальних приладів (*мультиметрів*), які призначені для вимірювань постійного струму і напруги, змінного струму і напруги та електричного опору.

Діапазон вимірювань опорів цифрових омметрів широкий – від 10^{-3} Ом до 10^{12} Ом, але він вужчий, ніж у мостів постійного струму та аналогових омметрів. Цифровим омметрам властива висока точність вимірювання, так в діапазоні

опорів $1 \dots 10^6 \text{ Ом}$ мінімально можливе значення відносної похибки вимірювання становить $\pm 0,005 \%$.

До недоліків цифрових омметрів належить необхідність пропускання через вимірювальний опір порівняно великого струму, що не дає змоги застосувати їх для метрологічної повірки малопотужних резистивних перетворювачів. Але такі переваги, як автоматизація вимірювання, одержання результату вимірювання у цифровому коді, висока точність, зробили цифрові омметри найперспективнішими засобами вимірювання електричного опору.

6.2 Вимірювання електричного опору аналоговими омметрами

Омметри з магнітоелектричними вимірювальними механізмами будують за двома схемами: з послідовним і паралельним увімкненням вимірюваного опору R_X .

На рисунку 6.1.а наведена схема магнітоелектричного омметра з послідовним увімкненням вимірювального опору R_X і вимірювального механізму BM .

На рисунку 6.1.б наведена схема магнітоелектричного омметра з паралельним увімкненням вимірювального опору R_X і вимірювального механізму BM .

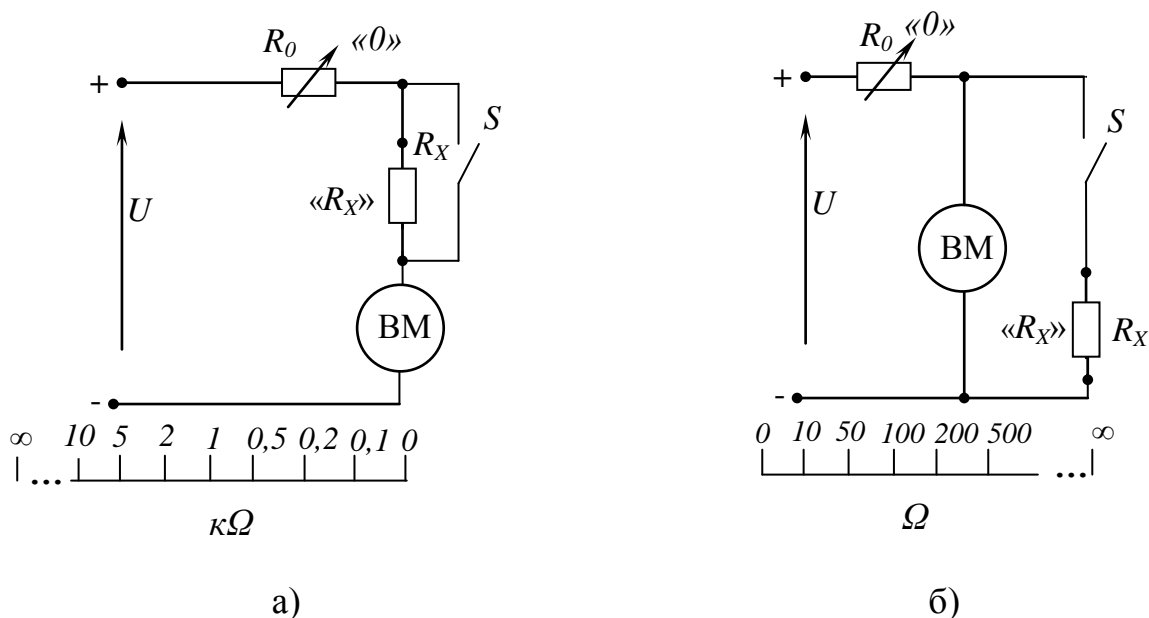


Рисунок 6.1 - Схема магнітоелектричного омметра

У схемі з послідовним увімкненням вимірюваного опору R_X та вимірювального механізму BM магнітоелектричної системи струм вимірювального механізму I_{BM} дорівнює

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM} + R_X}, \quad (6.1)$$

- якщо $R_X = 0$, то

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM}} = I_{max}; \quad (6.2)$$

- якщо $R_X = \infty$, то $I_{BM} = 0$,

де U – напруга джерела живлення;

R_0 – опір резистора регулювання.

Опір резистора регулювання R_0 призначений для встановлення нульового показу омметра («0») при закорочених за допомогою перемикача S вхідних за тискачах « R_X ».

Висновок: якщо $U = const$, струм I_{BM} є функцією R_X , шкала омметра обернена та істотно нелінійна (нерівномірна), максимальна чутливість схеми настає за умовою $R_X \gg R_{BM}$. Схема застосовується для вимірювання великих опорів – для мегаомметрів.

У схемі з паралельним увімкненням вимірюваного опору R_X та вимірювального механізму BM магнітоелектричної системи струм вимірювального механізму I_{BM} дорівнює

$$I_{BM} = \frac{U}{\frac{R_0 \cdot R_{BM}}{R_X} + R_0 + R_{BM}}, \quad (6.3)$$

- якщо $R_X = 0$, то $I_{BM} = 0$;

- якщо $R_X = \infty$, то

$$I_{BM} = \frac{U}{R_0 + R_{BM}} = I_{max}. \quad (6.4)$$

Висновок: якщо $U = const$, струм I_{BM} також є функцією R_X , а шкала омметра *пряма та істотно нелінійна (нерівномірна)*, максимальна чутливість схеми настає за умовою $R_X \ll R_{BM}$. Схема застосовується для вимірювання малих опорів – для *міліомметрів та омметрів*.

Основним недоліком схем омметрів з магнітоелектричним вимірювальним механізмом є залежність їх показів від стабільності напруги джерела живлення. Слід відзначити, що такого недоліку немає в омметрах з логотричним вимірювальним механізмом, схема якого наведена на рисунку 6.2.

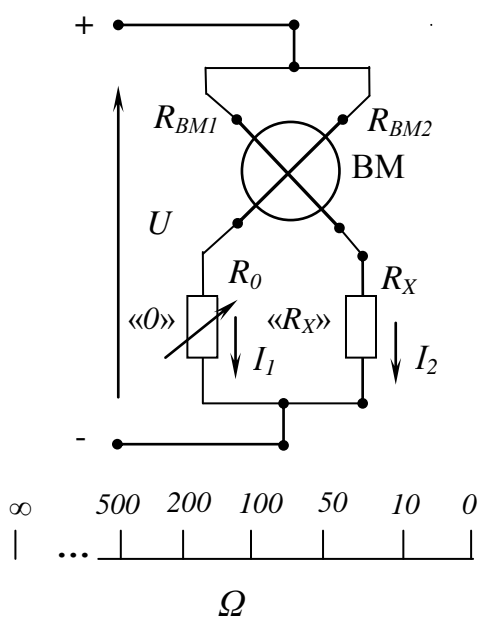


Рисунок 6.2 – Схема омметра з логотричним вимірювальним механізмом

Вимірюваний опір R_X з'єднаний послідовно з однією із котушок R_{BM1} логотриметра. Струми у колах котушок логотриметра дорівнюють

$$I_1 = \frac{U}{R_X + R_{BM1}}; \quad I_2 = \frac{U}{R_0 + R_{BM2}}. \quad (6.5)$$

Рівняння шкали омметра має вигляд

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_{BM2} + R_0}{R_{BM1} + R_X}\right) = f(R_X). \quad (6.6)$$

Покази омметра з логотричною схемою не залежать від напруги джерела живлення, однак шкала *обернена* і також є *істотно нелінійною*.

Клас точності аналогових омметрів позначають одним числом, яке дорівнює границі допустимої зведеної основної похибки омметра $\gamma_{P\Omega.zp}$.

Для омметрів з рівномірною (лінійною) шкалою

$$\gamma_{P\Omega.zp} = \pm \frac{\Delta R_{zp}}{R_N} \cdot 100\% = \pm c, \% \quad (6.7)$$

де ΔR_{zp} – границя допустимої абсолютної основної похибки омметра, Ом;
 R_N – нормувальне значення, яке дорівнює верхній границі вимірювання R_K , якщо нульова позначка шкали відповідає початку діапазону вимірювання $R_{ноч}$, або діапазону вимірювання $R_N = R_K - R_{ноч}$ омметра, Ом.

Для омметрів з істотно нерівномірною (нелінійною) шкалою нормувальне значення дорівнює довжині шкали, тобто зведена похибка таких омметрів виражена у відсотках від довжини шкали

$$\gamma_{P\Omega.zp} = \pm \frac{\Delta L_{zp}}{L_N} \cdot 100\% = \pm c, \% \quad (6.8)$$

де ΔL_{zp} – границя допустимої абсолютної основної похибки омметра, мм;
 L_N – довжина шкали омметра, яка відповідає діапазону вимірювання, мм.

Омметрам присвоюють такі класи точності:

- для омметрів з рівномірною шкалою $c = 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0$;
- для омметрів з нерівномірною шкалою клас точності позначається відповідно



6.3 Вимірювання електричного опору цифровими омметрами

Цифрові омметри є складовою частиною комбінованих цифрових вимірювальних приладів - *мультиметрів*, які призначені для вимірювань постійного

струму і напруги, змінного струму і напруги та електричного опору. Цифрові омметри випускаються як автономні прилади, конструкція яких – це мостові схеми постійного струму із автоматичним зрівноважуванням. Діапазон вимірювань опорів цифровими омметрами досить широкий: від 10^{-3} до 10^{12} Ом, але є вужчим, ніж у мостів постійного струму із ручним зрівноважуванням та аналогових електронних омметрів.

Цифровим омметрам властива висока точність вимірювання, так як відносна похибка вимірювання становить $\pm 0,005$ %. Слід відзначити й недоліки цифрових омметрів: необхідність пропускання через вимірюваний опір порівняно великого струму, що не дає змоги застосовувати цифрові омметри для метрологічної повірки малопотужних резистивних перетворювачів. Але такі переваги, як автоматизація вимірювання, одержання результату вимірювання у цифровому коді, висока точність вимірювань дозволили цифровим омметрам стати найперспективнішими засобами вимірювання електричного опору.

6.4 Вимірювання електричного опору методом амперметра і вольтметра

Метод вимірювання електричного опору за допомогою амперметра і вольтметра ґрунтується на використанні закону Ома для ділянки кола, згідно з яким опір об'єкту визначається за формулою

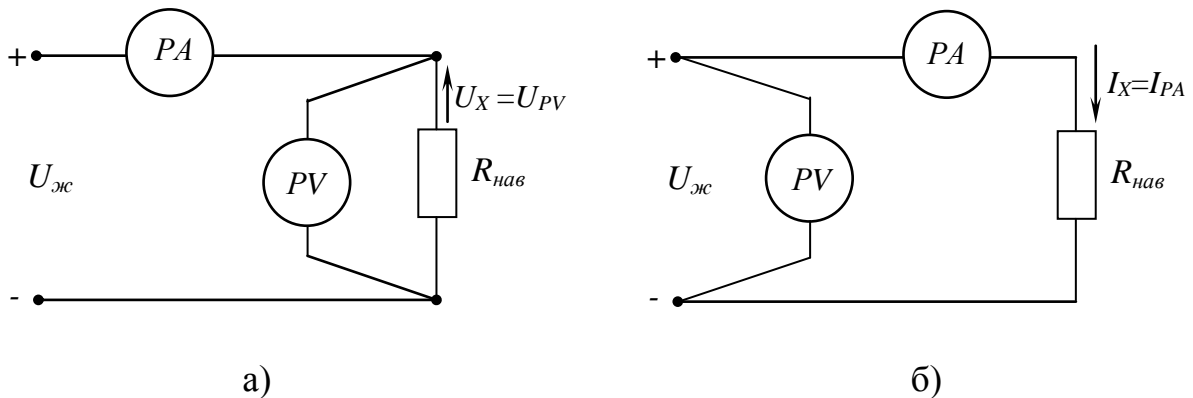
$$R_x = \frac{U_{PV}}{I_{PA}}. \quad (6.9)$$

Використання двох приладів й дало методу таку назву. Метод є незамінним під час вимірювання опорів резисторів, обмоток електричних машин та об'єктів, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику.

Для вимірювання опору за допомогою амперметра і вольтметра застосовують дві схеми вмикання приладів, які наведені на рисунку 6.3.

Вимірювання електричного опору методом амперметра і вольтметра є типовим різновидом *опосередкованих вимірювань*. Похибка вимірювання опору складається з похибок вимірювання струму та напруги амперметром і вольт-

метром, а також з методичної похибки, яка зумовлена споживанням потужності вимірювальними приладами і залежить від схеми їх увімкнення.



а) - схема правильного вимірювання напруги;
 б) - схема правильного вимірювання струму

Рисунок 6.3 - Схема вимірювання електричного опору методом амперметра і вольтметра

Виміряне за схемою правильного вимірювання напруги (див. рисунок 6.3.а) значення опору дорівнює

$$R_{X.вим} = \frac{U_{PV}}{I_{PA} + \frac{U_{PV}}{R_{PV}}} \quad (6.10)$$

Відносне значення методичної похибки визначається за формулою

$$\delta_m = -\frac{R_X}{R_{PV} + R_X} \cdot 100\% \quad (6.11)$$

Виміряне за схемою правильного вимірювання струму (див. рисунок 6.3.б) значення опору дорівнює

$$R_{X.вим} = \frac{U_{PV}}{I_{PA}} + R_{PA} \quad (6.12)$$

Відносне значення методичної похибки визначається за формулою

$$\delta_m = \frac{R_{PA}}{R_X} \cdot 100\% \quad (6.13)$$

В практиці електричних вимірювань слід вибирати ту схему вимірювання, яка забезпечує менше за модулем значення методичної похибки. Схему пра-

вільного вимірювання напруги доцільно застосовувати для вимірювання *малих опорів* ($R_X \ll R_{PV}$), а схему правильного вимірювання струму – для вимірювання *великих опорів* ($R_X \gg R_{PV}$).

Для забезпечення необхідної точності вимірювання опору необхідно не тільки правильно вибрати схему вимірювання, але й застосувати прилади відповідних класів точності і з такими границями вимірювання, щоб їх покази одержувати близько до кінця шкали.

6.5 Мостовий метод вимірювання опору

Мостовий метод вимірювань застосовують для точних вимірювань опору в діапазоні від 10^{-8} до 10^{16} Ом. Нижня границя вимірювання одинарними мостами з двозатискачевим підключенням вимірюваного опору обмежена десятками омів через вплив опорів з'єднувальних проводів на результат вимірювання. Для зменшення такого впливу в одинарних мостах передбачають двозатискачеве підключення з лінією компенсування, три- та чотиризатискачеве підключення резисторів, завдяки якому нижня границя вимірювань одинарних мостів класу 0,05 сягає тисячних часток Ом. Дуже малі опори вимірюють подвійними мостами постійного струму, діапазон вимірювань який знаходиться у межах $10^{-8} \dots 100$ Ом.

Під час прямого вимірювання опору одинарним мостом виконують одне зрівноважування, а результат вимірювань визначають за формулою

$$R_X = R_{II} \cdot \frac{R_{\epsilon 1}}{R_{\epsilon 2}}, \quad (6.14)$$

де R_{II} – опір плеча порівняння;

$R_{\epsilon 1}, R_{\epsilon 2}$ – опори плечей відношення.

Під час вимірювань змінюють піддіапазони в одинарних мостах шляхом змінення опорів плечей відношення.

6.6 Вимірювання електричного опору ізоляції

6.6.1 Особливості вимірювань великих опорів

До великих опорів ($10^7 \dots 10^{17}$ Ом) належать опори електроізоляційних матеріалів, які використовуються для ізоляції струмопровідних частин електричних машин, кабелів. Вимірюваними величинами при дослідженні електроізоляційних матеріалів є їх питомий об'ємний r_V опір та поверхневий r_S опір. Методом для вимірювання об'ємного R_V опору та поверхневого R_S опору з подальшим визначенням r_V та r_S є метод амперметра і вольтметра.

На рисунку 6.4 наведена схема вимірювання об'ємного опору ізоляційних матеріалів методом амперметра і вольтметра.

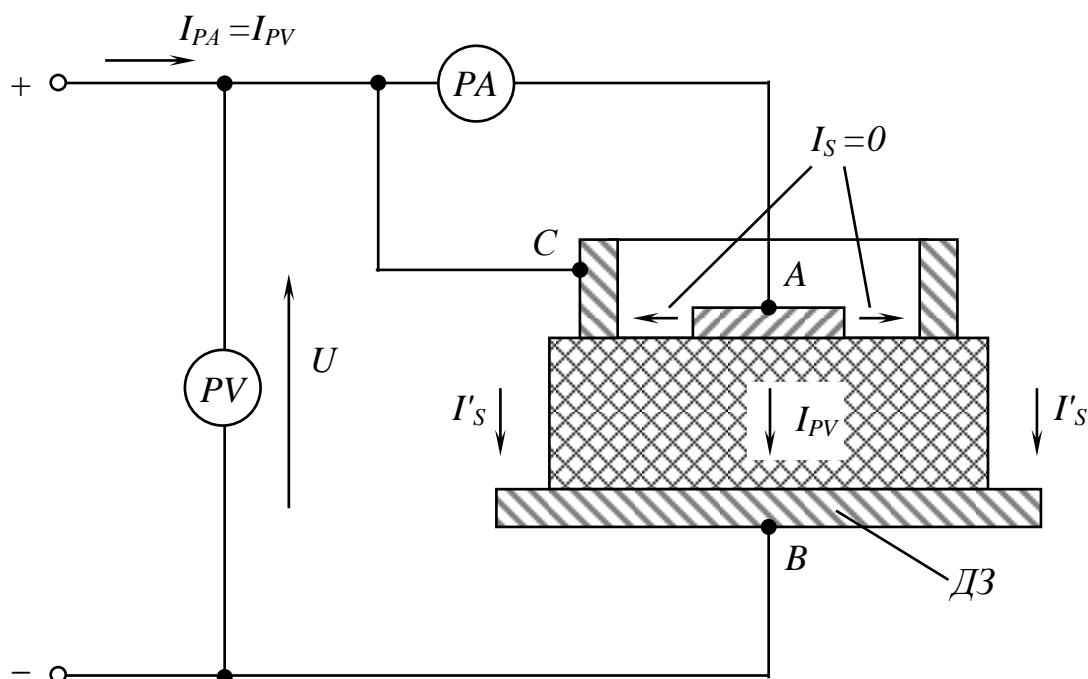


Рисунок 6.4 – Схема вимірювання об'ємного опору ізоляційних матеріалів методом амперметра і вольтметра

Електроди А і В виконані у формі пластин круглої форми, а електрод С – у формі кільця, і виготовлені вони з мідного провідного матеріалу з малим питомим опором. Під час вимірювання об'ємного R_V опору досліджуваного зразка (ДЗ) через амперметр протікає об'ємний струм I_{PV} між електродами А та В, тобто $I_{PV} = I_{PA}$. Поверхневий струм I_S між електродами А і С дорівнює нулю, так як внутрішній опір амперметра R_{PA} набагато менший від поверхневого опору R_S і

потенціали електродів А і С однакові, а поверхневий струм I_S між електродами С і В до кола амперметра не потрапляє.

Питомий об'ємний опір матеріалу досліджуваного зразка дорівнює

$$\rho_V = R_{PV} \cdot \frac{S}{l} = \frac{U}{I_{PA}} \cdot \frac{S_V}{l_V}, \quad (6.15)$$

де R_V – вимірний об'ємний опір ДЗ;

U, I_{PA} – відповідно покази вольтметра і амперметра;

S_{PV} – площа електрода А з діаметром D ;

l_{PV} – відстань між електродами А і В, яка є товщині ДЗ.

На рисунок 6.5 наведена схема вимірювання поверхневого опору ізоляційних матеріалів методом амперметра і вольтметра.

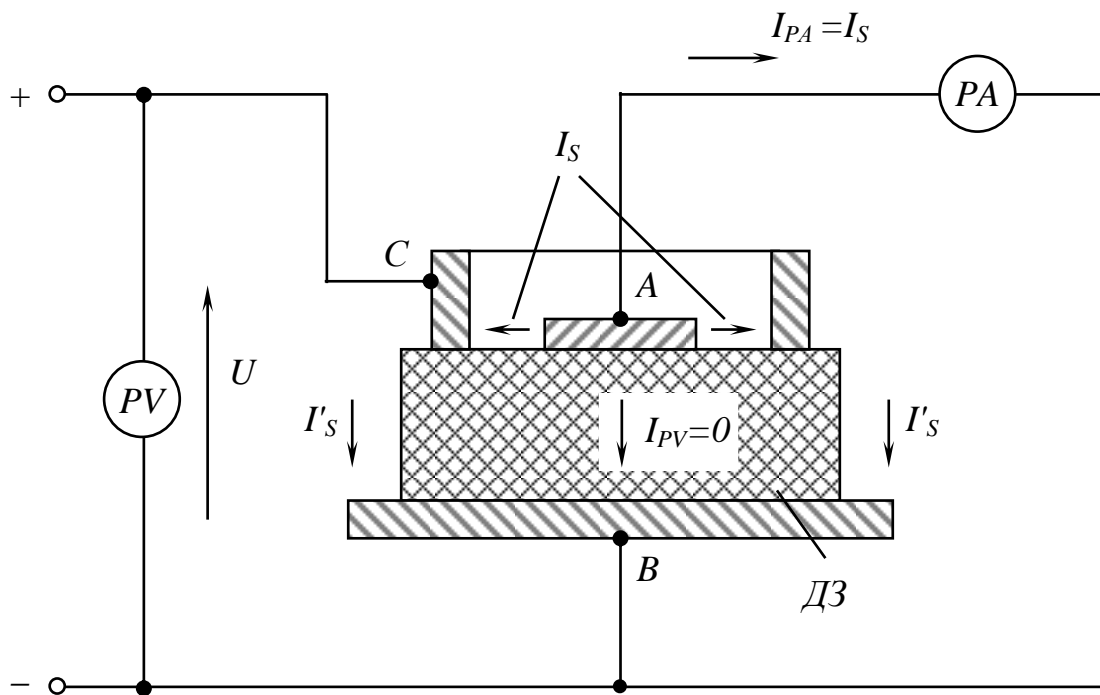


Рисунок 6.5 – Схема вимірювання поверхневого опору ізоляційних матеріалів методом амперметра і вольтметра

Під час вимірювання поверхневого опору R_S ДЗ через амперметр протікає тільки поверхневий I_S між електродами С і А, тобто $I_{PA} = I_S$. Об'ємний струм I_{PV} між електродами А і В практично дорівнює нулю, так як внутрішній опір амперметра R_{PA} набагато менший від об'ємного опору I_{PV} і потенціали електродів

А і В майже однакові, а поверхневий струм I_S між електродами С і В у коло амперметра не потрапляє.

Питомий опір матеріалу ДЗ дорівнює

$$\rho_S = \frac{2\pi \cdot U}{I_{PA} \cdot \ln\left(\frac{D_C}{D_A}\right)}, \quad (6.16)$$

де D_C – внутрішній діаметр електрода С;

D_A – зовнішній діаметр електрода А.

В обох випадках при вимірюваннях опорів, як об'ємного R_V , так й поверхневого R_S , вимірювальні прилади увімкнені за схемою правильного вимірювання струму. Це пояснюється тим, що в обох випадках вимірювань повинні виконуватися умови $R_{PA} \ll R_V$ і $R_{PA} \ll R_S$. Тому то, методичною похибкою від впливу внутрішнього опору амперметра можна знехтувати.

Необхідно також враховувати, що при випробуванні діелектриків їх електричний опір залежить від багатьох факторів – температури, вологості, значення прикладеної напруги та тривалості її дії, які можуть викликати появу додаткових похибок вимірювання величин ρ_V і ρ_S .

6.6.2 Вимірювання опору ізоляції електричних пристроїв, які не знаходяться під робочою напругою

Опір вимірюють за допомогою електромеханічних або електронних мегомметрів.

Електричні лінії можна представити еквівалентною схемою – рисунок 6.6, в якій між проводами А і В та землею З увімкнені зосереджені опори R_{AB} , R_{AZ} та R_{BZ} , які еквівалентні опорам ізоляції одиничних ділянок r_{AB} , r_{AZ} та r_{BZ} . За такою схемою здійснюють вимірювання опорів ізоляції R_{AB} між проводами А і В та опорів R_{AZ} та R_{BZ} проводів А і В відповідно землі З.

За допомогою перемикача S мегомметр почергово під'єднують до віток трикутника R_{AB} - R_{AZ} - R_{BZ} і вимірюють еквівалентні опори R_{11} , R_{22} , R_{33} .

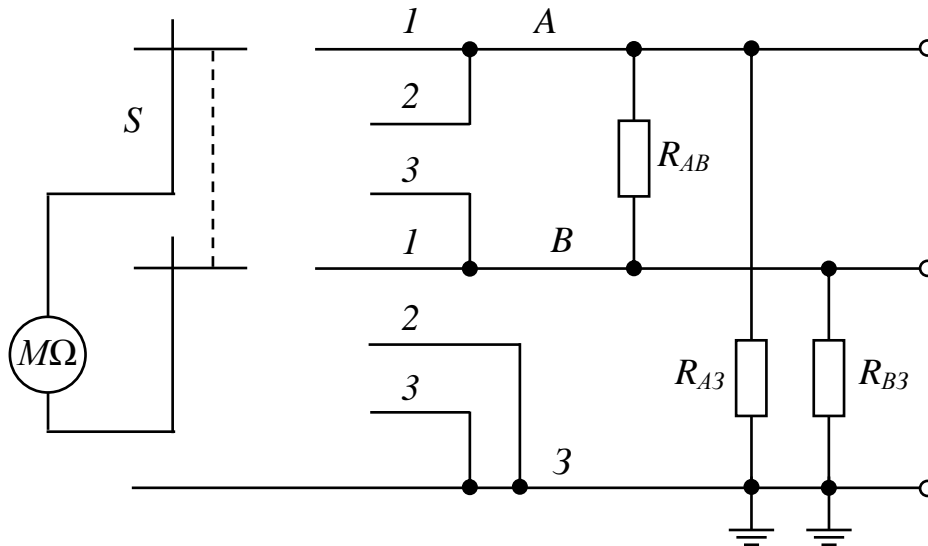


Рисунок 6.6 – Схема вимірювання опорів ізоляції R_{AB} між проводами А і В та опорів R_{AZ} та R_{BZ} проводів А і В відповідно землі З

Значення окремих опорів ізоляції R_{AB} , R_{AZ} , R_{BZ} визначають при розв’язанні системи рівнянь, так як таке вимірювання є сукупним вимірюванням

$$R_{11} = \frac{R_{AB}(R_{AZ} + R_{BZ})}{R_{AB} + R_{AZ} + R_{BZ}}; \quad R_{22} = \frac{R_{AZ}(R_{AB} + R_{BZ})}{R_{AB} + R_{AZ} + R_{BZ}}; \quad R_{33} = \frac{R_{BZ}(R_{AB} + R_{AZ})}{R_{AB} + R_{AZ} + R_{BZ}}. \quad (6.17)$$

Аналогічно вимірюють опір ізоляції у трипровідних та чотирипровідних трифазних мережах.

6.6.3 Вимірювання опору ізоляції електричних пристроїв, які знаходяться під робочою напругою

За схемою, яка наведена на рисунку 6.7, вимірюють опір ізоляції електричних пристроїв, які знаходяться під робочою напругою, при цьому по чергові вимірюється вольтметром PV напруга мережі U_{AB} та напруги U_{AZ} і U_{BZ} між проводами А і В та землею З.

Спочатку перемикач S встановлюють в положення 1-1 і вимірюють напругу мережі U_{AB} , а потім увімкнувши вольтметр між проводом А та землею З (перемикач S в положенні 2-2), здійснюють вимірювання напруги U_{AZ} .

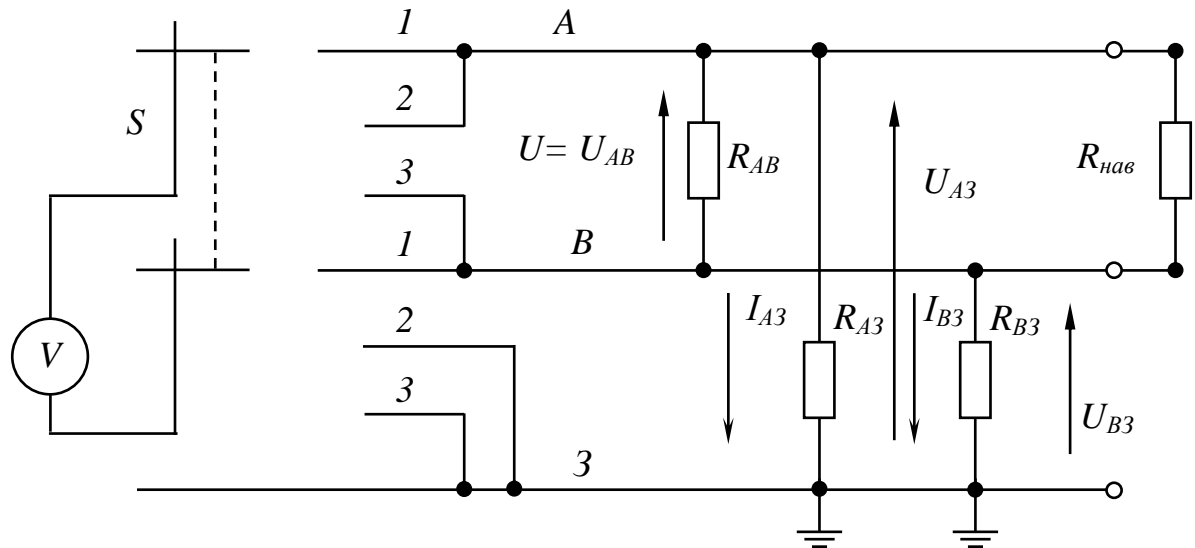


Рисунок 6.7 – Схема вимірювання опору ізоляції двохпровідної мережі під робочою напругою

Значення струму I_{B3} , який протікає через опір ізоляції R_{B3} проводу В відносно землі З, визначають за формулою

$$I_{B3} = \frac{U_{B3}}{R_{B3}} = \frac{U - U_{A3}}{R_{B3}} = \frac{U}{R_{B3} + \frac{R_{A3} \cdot R_{PV}}{R_{A3} + R_{PV}}}, \quad (6.18)$$

де R_{PV} - внутрішній опір вольтметра.

Аналогічно знаходять значення струму I_{A3} , який протікає через опір ізоляції R_{A3} проводу А відносно землі З (перемикач S в положенні 3-3) за формулою

$$I_{A3} = \frac{U_{A3}}{R_{A3}} = \frac{U - U_{B3}}{R_{A3}} = \frac{U}{R_{A3} + \frac{R_{B3} \cdot R_{PV}}{R_{B3} + R_{PV}}}. \quad (6.19)$$

При цьому після проміжних перетворень визначають опори ізоляції

$$R_{A3} = R_{PV} \cdot \frac{U - U_{A3} - U_{B3}}{U_{B3}}; \quad R_{B3} = R_{PV} \cdot \frac{U - U_{A3} - U_{B3}}{U_{A3}}. \quad (6.20)$$

Якщо опори ізоляції R_{A3} та R_{B3} набагато перевищують опір вольтметра, їх значення визначають за формулами

$$R_{A3} = R_{PV} \cdot \left(\frac{U}{U_{B3}} - 1 \right); \quad R_{B3} = R_{PV} \cdot \left(\frac{U}{U_{A3}} - 1 \right). \quad (6.21)$$

6.6.4 Визначення місця пошкодження ізоляції кабелю

У разі пошкодження ізоляції кабельної лінії важливо визначити місце його пошкодження, щоб усунути його. У кабелях можуть бути такі пошкодження: пробій ізоляції між жилою і бронєю, пробій ізоляції між жилами та обрив жили.

Одним найпростішим методом визначення місця пошкодження ізоляції кабелю є *метод петлі Муррея*, який ґрунтується на застосуванні схеми одинарного моста постійного струму, в плечі якого вмикають жили кабелю $c-d$ і $c'-d'$ – рисунок 6.8.

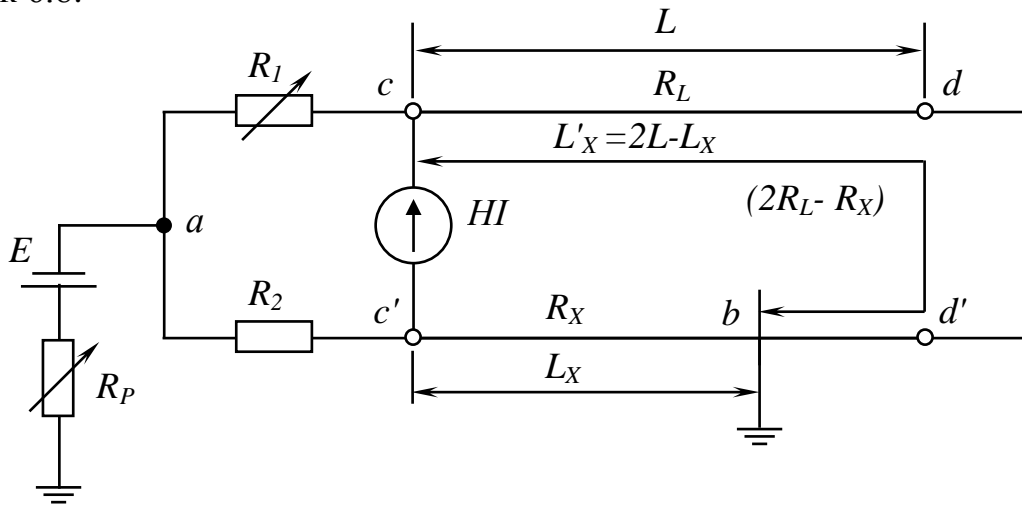


Рисунок 6.8 – Схема визначення місця пошкодження ізоляції кабелю методом петлі Муррея

Два кінці d і d' непошкодженої та пошкодженої жил закорочують, а до двох інших c і c' під'єднують нуль-індикатор (НІ) та два плеча одинарного моста R_1 та R_2 , одне з яких має бути змінним і може бути використовуватись для зрівноваження моста. Джерело живлення E та регулятор чутливості R_p під'єднують до діагоналі живлення моста між спільною точкою a плечей R_1 та R_2 і точкою b , в якій є пошкодження ізоляції.

Алгоритм вимірювань складається з таких етапів:

- здійснюється зрівноваження моста $a-c-b-c'$ змінюванням опору R_1 ;
- з рівняння рівноваги моста $R_1 \cdot R_x = R_2 \cdot (2 \cdot R_L - R_x)$ визначають опір пошко-

дженої жили $R_x = \frac{2 \cdot R_2 \cdot R_L}{R_1 + R_2}$;

- визначення відстані L_x від початку кабелю c' до точки b (місця пошкодження ізоляції) за формулою

$$L_x = \frac{R_x \cdot S}{\rho} = 2 \cdot L \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad (6.22)$$

- перевірка результату вимірювань, для цього необхідно поміняти місцями кінці кабелю c і c' ;

- визначення відстані до місця пошкодження ізоляції за формулою

$$L'_x = 2 \cdot L \cdot \frac{R'_2}{R'_1 + R'_2}, \quad (6.23)$$

де R'_1 та R'_2 – значення опорів плечей моста, які одержані при другому зрівноваженні;

- правильність результату вимірювання повинно підтвердитись рівністю

$$L_x + L'_x = 2L. \quad (6.24)$$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 6

1 Яка схема увімкнення приладів забезпечує меншу похибку опосередкованого вимірювання опору R_x , якщо відомі внутрішні опори амперметра R_{PA} та вольтметра R_{PV} ? (див. таблицю до завдання)

№ варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_{PV}, \text{ Ом}$	1000	10^4	$2 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^3$	10^3	$5 \cdot 10^3$	10^4	10^5
$R_{PA}, \text{ Ом}$	0,1	0,02	0,05	0,01	0,3	0,5	0,1	0,2	0,05
$R_x, \text{ Ом}$	0,5	20	300	5000	150	0,01	15	75	200

2 Записати результат опосередкованого вимірювання опору R_x за допомогою амперметра класу точності 0,5 з границею вимірювання 0,75 А і внутрішнім опором 0,1 Ом та вольтметра класу точності 1,0 з границею вимірювання 3,0 В і внутрішнім опором $3 \cdot 10^4$ Ом, які увімкненні за схемою правильного вимірювання напруги, якщо показ амперметра при цьому 0,5 А, а вольтметра – 2,0 В.

3 Записати результат вимірювання опору за допомогою омметра, метрологічні характеристики якого:

- тип МЗ71;

- клас точності



- границя вимірювання $10 \dots 100 \text{ Ом}$; $100 \dots 1000 \dots 10000 \text{ Ом}$; $100 \text{ кОм} \dots 10 \text{ МОм}$;

- довжина шкали 68 мм ;

- робочі умови застосовування група 5.

При вимірюваннях у діапазоні $100 \dots 10000 \text{ Ом}$ одержано показ 5000 Ом .

4 Оцінити похибку вимірювання опору $R_x = 1510 \text{ Ом}$ цифровим омметром класу точності $0,15/0,05$ з верхньою границею вимірювання 1000 Ом за умови чотиридротового підключення

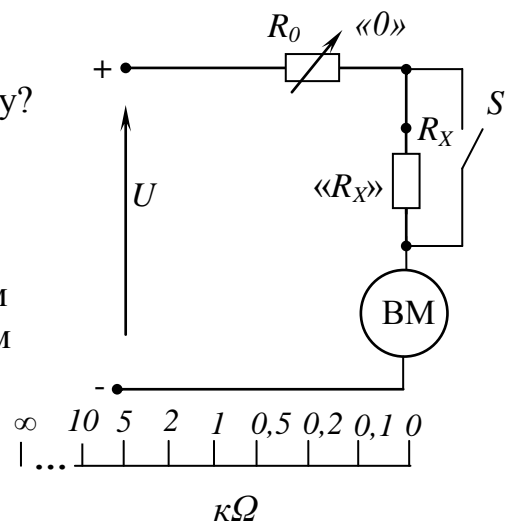
5 Записати результат вимірювання опору за допомогою цифрового омметра, якщо на границі вимірювання 1 МОм було одержано показ 260 кОм .

6 Вибрати значення плечей відношення моста під час вимірювання опору 26800 Ом , якщо опір плеча порівняння може змінюватись у межах $0 \dots 11111,10 \text{ Ом}$.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 6

1. Схема якого омметра наведена на рисунку?

- 1 омметра з логометричним вимірювальним механізмом
- 2 цифрового омметра
- 3 омметра з послідовним увімкненням
- 4 омметра з паралельним увімкненням

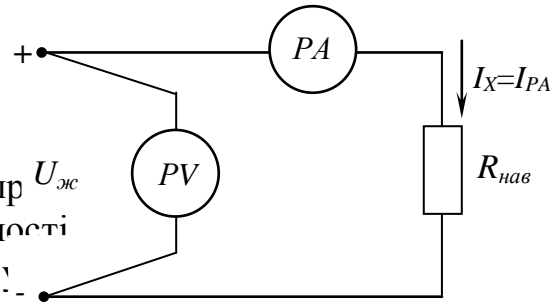


2. Який метод вимірювання електричного опору ґрунтується на використанні закону Ома?

- 1 амперметра і вольтметра
- 2 двох ватметрів
- 3 безпосереднього порівняння зі зразковим приладом

3. Оберіть вірну назву наведеної схеми вимірювання електричного опору.

- 1 схема правильного вимірювання напруги $U_{жс}$
- 2 схема вимірювання активної потужності
- 3 схема правильного вимірювання струму
- 4 схема вимірювання об'ємного опору



4. Які прилади призначені для вимірювання опору ізоляції електричних пристроїв, які не знаходяться під робочою напругою?

- 1 електромеханічні та електронні мегомметри
- 2 вольтметри
- 3 вимірювальні мости
- 4 омметри

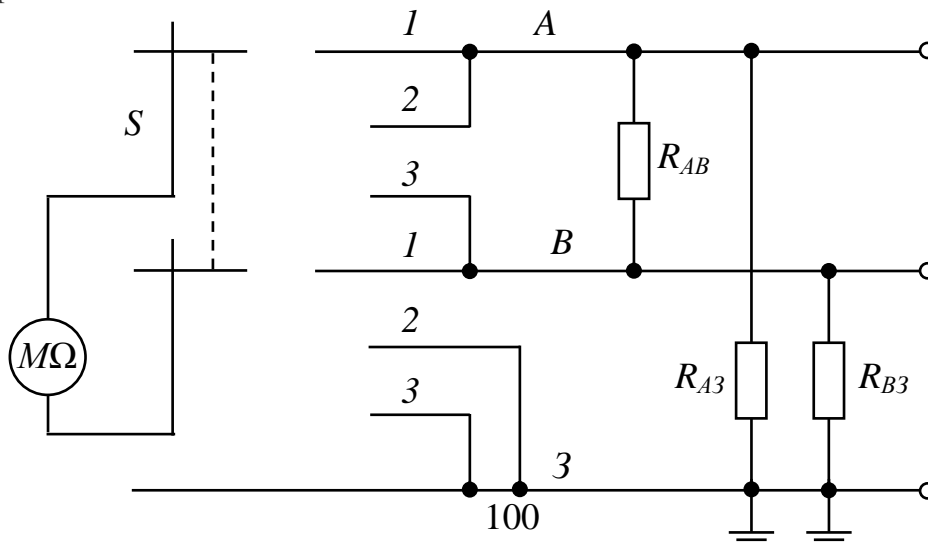
5. Яким методом визначається місце пошкодження ізоляції кабелю?

- 1 методом амперметра і вольтметра
- 2 методом двох ватметрів
- 3 методом амперметра, вольтметра і ватметра
- 4 методом петлі Муррея

6. Які вимірювання електричного опору здійснюються методом амперметра і вольтметра та за допомогою компенсаторів постійного струму і компараторів напруг?

- 1 опосередковані вимірювання
- 2 вимірювання за допомогою вимірювальних мостів постійного струму
- 3 вимірювання опорів у діапазоні від 10^{-5} до 10^9 Ом
- 4 прямі вимірювання

7. Яке призначення наведеної схеми?



1 схема вимірювання опору ізоляції електричних пристроїв, які не знаходяться під робочою напругою

2 схема визначення місця пошкодження ізоляції кабелю методом петлі Муррея

3 схема вимірювання опору заземлення компенсаційним методом

4 схема вимірювання опору ізоляції електричних пристроїв, які знаходяться під робочою напругою

8. Складіть логічні пари. Які існують види омметрів?

1 мікроомметри

2 міліомметри

3 омметри

4 кілоомметри

5 мегаомметри

6 тераомметри

7 з верхньою границею 1000 $МОм$

8 з нижньою границею $10^{-5} Ом$

9 з верхньою границею більш, ніж $10^9 Ом$

10 з верхньою границею 1 $МОм$

11 з нижньою границею $10^{-3} Ом$

12 з нижньою границею 10 $тОм$

РОЗДІЛ 7.

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ

7.1 Загальні положення

Важливими елементами електричних кіл змінного струму є *резистори*, *конденсатори* і *катушки індуктивності*.

Діапазони вимірювань параметрів елементів кіл змінного струму (*вимірювань* R , L , C) досить широкі і становлять для ємності $10^{-8} \dots 10^4$ мкФ, для тангенса кута втрат $\operatorname{tg} \delta$ $10^{-5} \dots 10$ та для індуктивності $10^{-7} \dots 10^3$ Гн, для добротності катушки Q $10^{-2} \dots 10^3$. Точність вимірювань залежить від методів і засобів вимірювань та від значень вимірюваних величин.

Вимірювання R , L , C поділяють на *прямі* та *опосередковані* – рисунок 7.1.

Прямі методи вимірювання параметрів R , C , L здійснюються методами *безпосередньої оцінки* та *безпосереднього порівняння з мірою*.

Методи безпосередньої оцінки реалізують за допомогою аналогових електромеханічних і електронних та цифрових вимірювачів R , C , L . Аналогові електромеханічні вимірювальні прилади безпосередньої оцінки застосовують для вимірювання ємності – *фарадметри*, які і будують на основі логометричних вимірювальних механізмів електродинамічної системи, та на основі приладів випрямної системи у складі комбінованих приладів (тестерів).

Аналогові електронні вимірювачі ємності будують на основі випрямних приладів із застосуванням електронних вузлів у складі комбінованих приладів (тестерів). *Перевагами* аналогових вимірювачів R , C , L є простота конструкції, надійність та зручність у користуванні, а *недоліками* - невисока точність (клас точності 1,0 та нижче), обмежений діапазон вимірювань та залежність показів від частоти.

Високу точність та швидкодію мають *цифрові вимірювачі* R , C , L , які побудовані на принципі прямого перетворення параметрів комплексного опору в пропорційні значення напруги, частоти або інтервалу часу з подальшим анало-

го-цифровим перетворенням цих проміжних величин і вимірюванням їх значень. Такі прилади мають назву *мультиметри* – комбіновані універсальні вимірювальні прилади.



Рисунок 7.1 – Класифікація методів і засобів вимірювання параметрів елементів кіл змінного струму - R, L, C

Найточнішими приладами для вимірювання параметрів конденсаторів та котушок індуктивності є *мости змінного струму*, які, крім основних параметрів C та L , призначені також для вимірювання тангенса кута втрат $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторів та добротності Q котушок індуктивності. Похибки вимірювань мостами змінного струму можуть становити тисячні частки відсотка у широкому діапазоні значень вимірюваних величин.

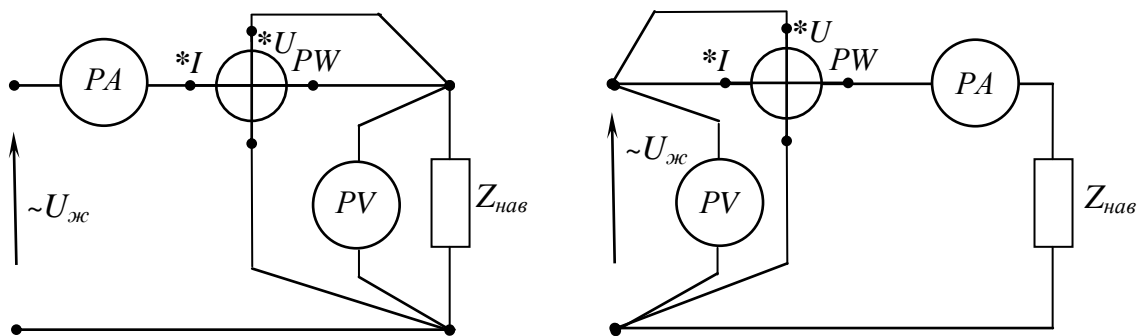
Опосередковані вимірювання параметрів R , C , L здійснюють методами *двох приладів* (амперметра і вольтметра) або *трьох приладів* (амперметра,

вольтметра і ватметра), *резонансним методом* (куметрами) та *методом перетворення параметрів R, C, L в напругу* за допомогою електронних перетворювачів.

7.2 Вимірювання параметрів елементів кіл змінного струму методом амперметра, вольтметра і ватметра

7.2.1 Вимірювання складових комплексного опору

Вимірювання складових комплексного опору здійснюють за допомогою трьох приладів – амперметра, вольтметра і ватметра за схемами правильного вимірювання напруги та правильного вимірювання струму – рисунок 7.2.а та рисунок 7.2.б, відповідно.



а) б)
а - схема правильного вимірювання напруги;
б - схема правильного вимірювання струму

Рисунок 7.2 - Схема опосередкованого вимірювання складових комплексного опору

Повний комплексний опір конденсатора чи котушки індуктивності визначається за формулою

$$Z_X = \frac{U_{PV}}{I_{PA}} = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (7.1)$$

Активна складова комплексного опору (опір втрат) визначається за формулою

$$R = \frac{P_{PW}}{I_{PA}^2} \quad \text{або} \quad R = \frac{U_{PV}^2}{P_{PW}} \quad (7.2)$$

Реактивна складова комплексного опору визначається за формулою

$$X = \sqrt{Z_X^2 - R^2} = \frac{1}{I_{PA}} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 - \frac{P_{PW}^2}{I_{PA}^2}} \quad \text{або} \quad X = U_{PV} \cdot \sqrt{\frac{1}{I_{PA}^2} - \frac{U_{PV}^2}{P_{PW}^2}}. \quad (7.3)$$

де I_{PA} , U_{PV} , P_{PW} – відповідно покази амперметра PA (A), вольтметра PV (В) та ватметра PW (Вт).

Згідно формул (7.1)...(7.3) параметри досліджуваного конденсатора визначаються за формулами

- ємність

$$C_X = \frac{1}{\omega \cdot X} = \frac{I_{PA}^2}{2\pi \cdot f} \cdot \frac{1}{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}}; \quad (7.4)$$

- тангенс кута втрат

- для послідовної схеми заміщення

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega \cdot R \cdot C_X = \frac{P_{PW}}{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}}; \quad (7.5)$$

- для паралельної схеми заміщення

$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C_X} = \frac{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}}{P_{PW}}. \quad (7.6)$$

Параметри досліджуваної котушки індуктивності визначаються за формулами

- індуктивність

$$L_X = \frac{X}{\omega} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot I_{PA}^2} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}; \quad (7.7)$$

- добротність

- для послідовної схеми заміщення

$$Q = \frac{\omega \cdot L_X}{R} = \frac{1}{P_{PW}} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}; \quad (7.8)$$

- для паралельної схеми заміщення

$$Q = \frac{R}{\omega \cdot L_X} = \frac{P_{PW}}{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}}. \quad (7.9)$$

Точність вимірювань за таким методом невисока, так як вона визначається точністю використаних вимірювальних приладів та їх власним споживанням потужності, а також точністю встановлення частоти. Для зменшення впливу на результат вимірювання потужності, яку споживають вимірювальні прилади, схему правильного вимірювання напруги (див. рисунок 7.2.а) застосовують для вимірювання порівняно малих опорів, а схему правильного вимірювання струму – для вимірювання порівняно великих опорів.

Приклад 7.1 Визначити значення комплексного опору Z_X , еквівалентного опору втрат $R_{екв}$ та індуктивність L котушки індуктивності на частоті 50 Гц за результатами експериментальних досліджень, якщо покази вольтметра $U_{PV} = 22,7 \text{ В}$, амперметра $I_{PA} = 10,3 \text{ А}$ та ватметра $P_{PW} = 17,2 \text{ Вт}$.

Розв'язання 1.Значення еквівалентного опору втрат визначається

$$R_{екв} = \frac{P_{PW}}{I_{PA}^2} = \frac{17,2}{10,3^2} = 0,16 \text{ Ом.}$$

2. Значення комплексного опору визначається

$$Z_X = \frac{U_{PV}}{I_{PA}} = \frac{22,7}{10,3} = 2,2 \text{ Ом.}$$

3. Значення індуктивності визначається

$$L = \frac{1}{2\pi \cdot f} \cdot \sqrt{Z_X^2 - R_{екв}^2} = \frac{1}{2\pi \cdot 50} \cdot \sqrt{2,2^2 - 0,16^2} = 0,0070 \text{ Гн.}$$

7.2.2 Вимірювання взаємної індуктивності

Взаємну індуктивність вимірюють опосередковано за методами вимірювання індуктивності.

На рисунку 7.3 наведена схема вимірювання взаємної індуктивності за методом трьох приладів – амперметра, вольтметра та ватметра при узгодженому (рисунок 7.3.а) і зустрічному (рисунок 7.3.б) увімкненнях двох котушок L_1 та L_2 , взаємну індуктивність $M_{1,2}$ між якими необхідно виміряти.

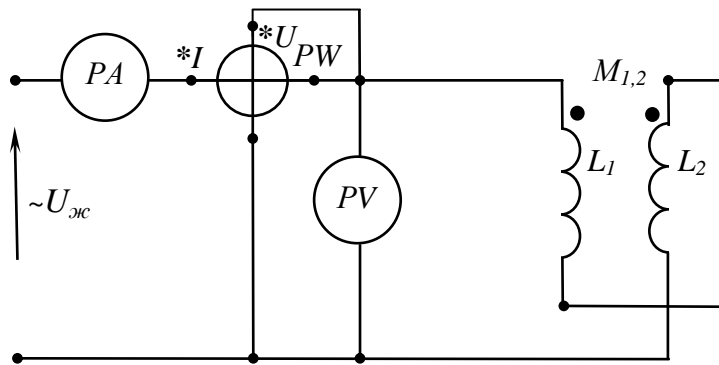


Рисунок 7.3.а - Схема вимірювання взаємної індуктивності $M_{1,2}$ за методом трьох приладів – амперметра, вольтметра та ватметра при узгодженому увімкненні двох котушок L_1 та L_2

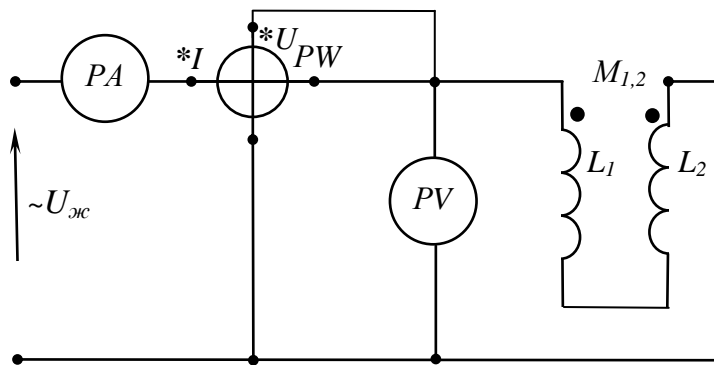


Рисунок 7.3.б - Схема вимірювання взаємної індуктивності $M_{1,2}$ за методом трьох приладів – амперметра, вольтметра та ватметра при зустрічному увімкненні двох котушок L_1 та L_2

При узгодженому увімкненні котушок здійснюються вимірювання струму $I_{уз}$, напруги $U_{уз}$ та активної потужності $P_{уз}$ – це дослід I.

При зустрічному увімкненні котушок здійснюються вимірювання струму $I_{зуст}$, напруги $U_{зуст}$ та активної потужності $P_{зуст}$ – це дослід II.

Значення взаємної індуктивності $M_{1,2}$ визначається за формулою

$$M_{1,2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{уз}}{I_{уз}}\right)^2 - \left(\frac{P_{уз}}{I_{уз}^2}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{U_{зуст}}{I_{зуст}}\right)^2 - \left(\frac{P_{зуст}}{I_{зуст}^2}\right)^2}}{4 \cdot \omega}. \quad (7.10)$$

Взаємну індуктивність вимірюють за схемою, яка наведена на рисунку 7.4, за методом двох вольтметрів.

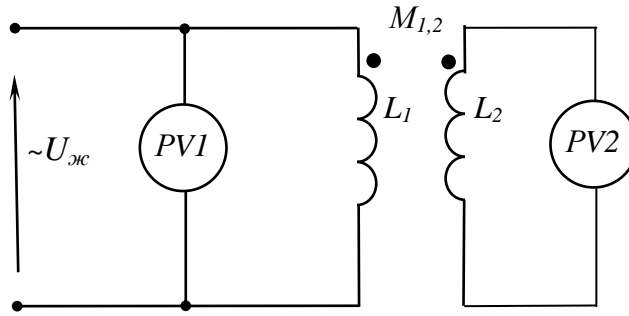


Рисунок 7.4 – Схема вимірювання взаємної індуктивності $M_{1,2}$ за методом двох вольтметрів

Значення взаємної індуктивності $M_{1,2}$ визначається за формулою

$$M_{1,2} = k_{зв} \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}, \quad (7.11)$$

де $k_{зв}$ – коефіцієнт зв'язку.

За умов, якщо $\omega L_1 \gg R_{L1}$ і $\omega L_2 \gg R_{L2}$, а опір вольтметра $PV2$ повинен бути $R_{PV2} \gg Z_{L2} = \sqrt{(\omega L_2)^2 + R_{L2}^2}$, тоді

$$k_{зв} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}, \quad (7.12)$$

де w_1, w_2 – кількість витків двох котушок.

Взаємну індуктивність вимірюють за схемою, яка наведена на рисунку 7.5, за методом двох приладів – амперметра і вольтметра.

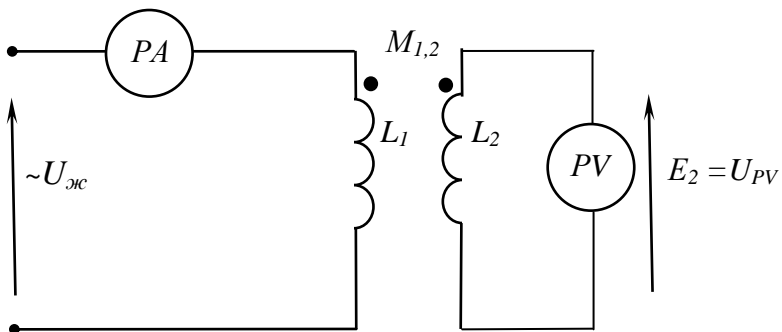


Рисунок 7.5 – Схема вимірювання взаємної індуктивності $M_{1,2}$ за методом двох приладів - амперметра і вольтметра

Значення взаємної індуктивності $M_{1,2}$ визначається за формулою

$$M_{1,2} = \frac{E_2}{\omega \cdot I_1} = \frac{U_{PV}}{2\pi \cdot f \cdot I_{PA}}. \quad (7.13)$$

7.3 Вимірювання параметрів елементів кіл змінного струму резонансним методом

Резонансний метод вимірювання параметрів елементів кіл змінного струму – це метод, суть якого полягає у визначенні резонансної частоти f_0 коливної контури, один з елементів якої є зразковий конденсатор або котушка індуктивності з точно відомим значенням ємності C_N або індуктивності L_N , а інший – це досліджуваний елемент, параметр якого (індуктивність L_X або ємність C_X) визначається за формулою

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}. \quad (7.14)$$

Резонансний метод реалізований у спеціальних вимірювальних приладах – *куметрах*, які використовують для вимірювання параметрів кіл змінного струму у широкому діапазоні частот від 1 $\kappa\Gamma\upsilon$ до 300 $M\Gamma\upsilon$.

На рисунку 7.6 наведена схема куметра, який складається з генератора високої частоти (*ГВЧ*), з вимірювального (резонансного) контуру, з індикатора резонансу – електронного вольтметра *PV2*, який градуйований в одиницях добротності котушки індуктивності Q . Вимірювальний (резонансний) контур містить досліджувану L_X або L_N котушки індуктивності та зразковий конденсатор C_N із змінною ємністю і градуйованою шкалою.

Розглянемо як виміряти добротність котушки індуктивності куметром.

На вимірювальний контур, який містить досліджувану котушку L_X та зразковий конденсатор C_N , через ємнісний подільник *ПН* подають невелику частину U_I вихідної напруги U_G генератора високої частоти *ГВЧ*. Значення напруги U_I необхідно підтримувати на рівні 0,2 B за допомогою вхідного електронного вольтметра *PV1*.

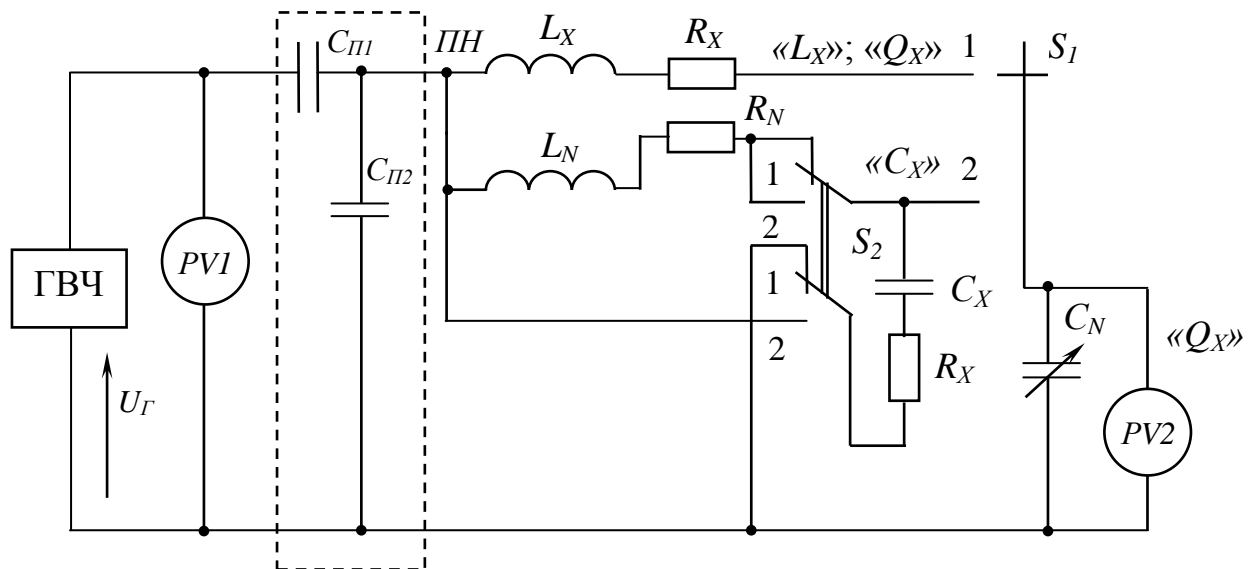


Рисунок 7.6 - Схема куметра

При зміні частоти вихідної напруги U_G генератора високої частоти ГВЧ виникає резонанс, при якому $\omega^2 \cdot L_X \cdot C_N = 1$ і відношення U_2/U_1 сягає максимуму

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right|_{\max} = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_N \cdot R_X} = \frac{\omega \cdot L_X}{R_X} = Q_X. \quad (7.15)$$

Максимальний показ вольтметра $PV2$ буде дорівнювати

$$U_{2\max} = U_1 \cdot Q_X. \quad (7.16)$$

Тому то при сталому значенні напруги вольтметра $PV1$ шкалу індикатора резонансу (вольтметр $PV2$) проградували безпосередньо в одиницях добротності Q . Цей й надало назву таким приладам – *куметри*. За результатами вимірювань куметрами за допомогою обчислень можна визначити індуктивність, ємність, опір втрат та повний опір параметрів елементів кіл змінного струму.

Розглянемо як виміряти індуктивність котушки куметром.

Досліджувану котушку з опором R_X та з індуктивністю L_X , яку необхідно виміряти, підключають до вхідних затискачів приладу, а перемикач роду роботи S_1 встановлюють в положення «1» - рисунок 7.6. Зміною частоти напруги генератора ГВЧ та ємності зразкового конденсатора C_N коливальний контур на-

лагоджують на резонанс. Коливальний контур при такому вимірюванні містить послідовно з'єднані котушку індуктивності L_X та конденсатор C_N . Оператор здійснює відлік показів добротності, ємності C_N та резонансної частоти f_0 .

За результатами вимірювань визначають реактивний опір X_L (X_C), індуктивність L_X та опір втрат R_X за відповідними формулами

$$X_L = 2\pi \cdot f_0 \cdot L_X; \quad (7.17)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_N}; \quad (7.18)$$

$$L_X = \frac{X_L}{2\pi \cdot f_0} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C_N}; \quad (7.19)$$

$$R_X = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot L_X}{Q} = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_N \cdot Q}. \quad (7.20)$$

Розглянемо як виміряти ємність конденсаторів з втратами.

Вимірювальний контур містить котушку індуктивності L_N , яка послідовно з'єднана зі зразковим конденсатором C_N (перемикач роду робіт S_1 встановлюється в положення «2», « C_X »). Досліджуваний конденсатор C_X з опором втрат R_X за допомогою перемикача S_2 підключають або паралельно до зразкового конденсатора C_N або послідовно із зразковою котушкою індуктивності L_N .

Особливістю вимірювання є подвійне настроювання на резонанс. Оператор при цьому виконує такий алгоритм вимірювань:

- змінюється частота напруги генератора ГВЧ та ємності конденсатора C_N ;
- вимірювальний контур настроюється на резонанс, так як контур містить послідовно з'єднані зразкову котушку індуктивності L_X та зразковий конденсатор C_N ;

- запис одержаних значень резонансної частоти f_0 , ємності C_{N1} та добротності Q_1 , яка дорівнює

$$Q_1 = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot L_N}{R_N} = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_{N1} \cdot R_N}, \quad (7.21)$$

де R_N – активний опір зразкової котушки індуктивності L_N ;

- перемикач S_2 встановлюють в положення «1», зразковий конденсатор C_N підключають до досліджуваного конденсатора C_X ;
- зміною ємності зразкового конденсатора C_N настраюють коливний контур на резонанс, частота генератора f_0 при цьому не змінюється;
- запис одержаних значень ємності C_{N2} і добротності Q_2 ;
- розрахунок невідомої ємності та опору втрат за формулами

$$C_X = C_{N1} - C_{N2}; \quad (7.22)$$

$$R_X = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_{N1} \cdot (Q_1 - Q_2)}. \quad (7.23)$$

7.4 Мостові методи вимірювань параметрів R, L, C

Мостовий метод вимірювань параметрів комплексного опору є найдосконалішим та найкраще вивченим, так як забезпечується найвища точність та широкі функціональні можливості, незважаючи на складність будови мостів, необхідність великої кількості зразкових засобів та пристроїв керування.

Розглянемо схеми вимірювальних мостів змінного струму.

На рисунку 7.7 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $\operatorname{tg}\delta_x$ з малими втратами.

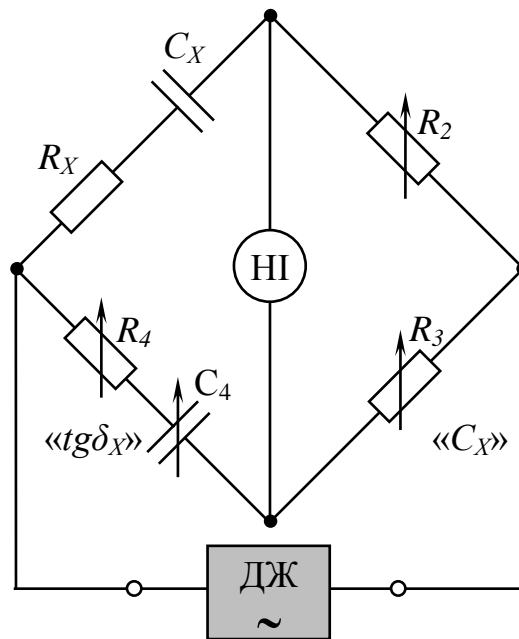


Рисунок 7.7 – Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $\operatorname{tg}\delta_x$ з малими втратами

Умова рівноваги моста змінного струму при вимірюванні ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з малими втратами має вигляд

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega \cdot C_x} \right) \cdot R_3 = \left(R_4 + \frac{1}{j\omega \cdot C_4} \right) \cdot R_2, \quad (7.24)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad tg_x = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot R_4 \cdot C_4. \quad (7.25)$$

З наведених формул можна зробити, що регулювальними елементами плечей моста доцільно обирати резистори R_3 і R_4 , кожен з яких входить тільки в одне з рівнянь для визначення C_x та $tg\delta$, причому резистор R_3 можна градуювати у значеннях C_x , а резистор R_4 – у значеннях $tg\delta$.

На рисунку 7.8 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з великими втратами.

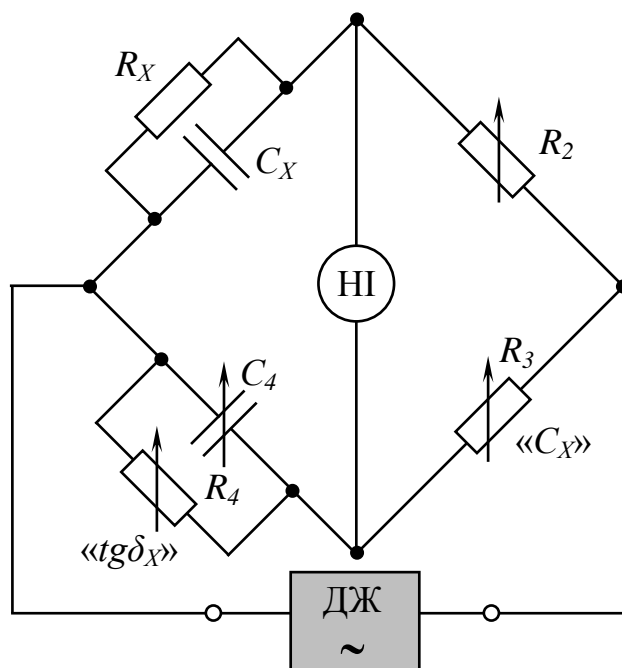


Рисунок 7.8 - Схема моста змінного струму для вимірювань ємності C_x і тангенса кута втрат $tg\delta_x$ з великими втратами

При використанні такого моста змінного струму справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad \text{tg } \delta_x = \frac{1}{\omega \cdot C_x \cdot R_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_4 \cdot R_4}, \quad (7.26)$$

де елементами регулювання є резистор R_3 при визначенні C_x та R_4 при визначенні $\text{tg } \delta$.

На рисунку 7.9 наведена схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя.

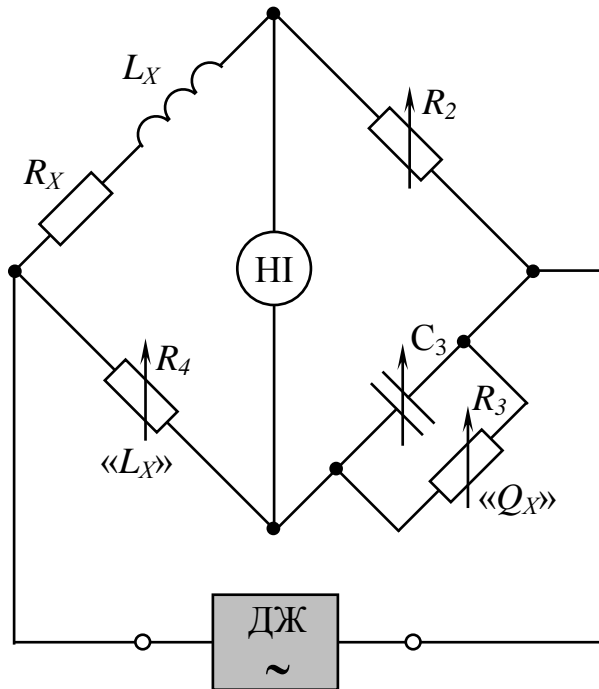


Рисунок 7.9 – Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя

Умова рівноваги моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя має вигляд

$$(R_x + j\omega \cdot L_x) \cdot \frac{\frac{R_3}{j\omega \cdot C_3}}{\left(R + \frac{1}{j\omega \cdot C_3} \right)} = R_2 \cdot R_4, \quad (7.27)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad Q_x = \frac{1}{\text{tg } \delta_x} = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \omega \cdot C_3 \cdot R_3. \quad (7.28)$$

Приклад 7.2 Визначити значення опору втрат R_x , ємності C_x та $tg\delta$ на частоті 50 Гц , якщо значення плечей і покази моста для вимірювання ємності конденсаторів з малими діелектричними втратами такі: $R_3 = 112,4 \text{ Ом}$, $R_4 = 51,7 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$, $C_4 = 2,7 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$.

Розв'язання: Для вимірювання ємності конденсаторів з малими втратами, яка наведена на рисунку 7.7. Значення величин визначаємо так:

$$R_x = R_4 \cdot \frac{R_2}{R_3} = 51,7 \cdot \frac{1 \cdot 10^4}{112,4} = 4600 \text{ Ом.}$$

$$C_x = C_4 \cdot \frac{R_3}{R_2} = 2,7 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{112,4}{1 \cdot 10^4} = 30,3 \text{ нФ.}$$

$$tg_x = \omega \cdot C_x \cdot R_x = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4,6 \cdot 10^3 \cdot 3,03 \cdot 10^{-11} = 4,38 \cdot 10^{-5}.$$

На рисунку 7.10 наведена схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок індуктивності з феромагнітним осердям.

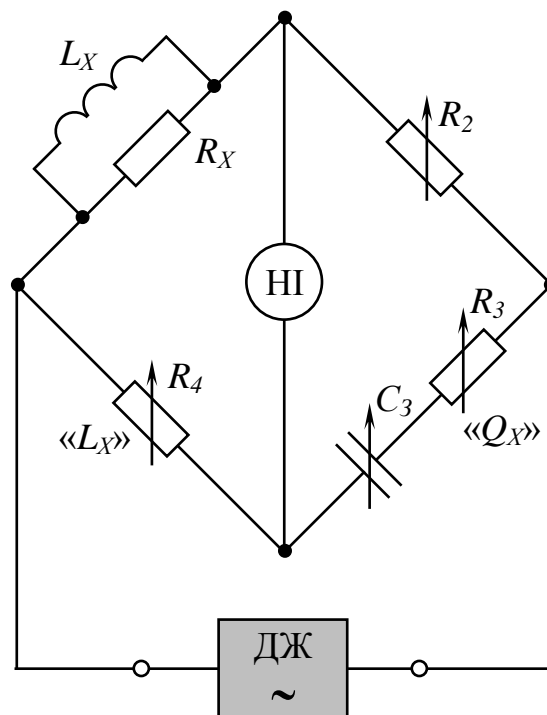


Рисунок 7.10 - Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності L_x і добротності Q_x котушок з феромагнітним осердям

При використанні такого моста змінного струму справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad Q_x = \frac{R_x}{\omega \cdot L_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_3 \cdot R_3}. \quad (7.29)$$

Приклад 7.3 Визначити значення параметрів плечей частотннезалежного моста, якщо індуктивність $L_x = 22,3 \text{ мГн}$, еквівалентний опір втрат $R_x = 1,82 \text{ Ом}$, добротність $Q = 769$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$, $C_3 = 8,2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$, $f = 1 \text{ кГц}$.

Розв'язання: Частотннезалежні мости використовують для вимірювання індуктивностей з високою добротністю. Із співвідношень (7.27) обчислимо

$$R_4 = \frac{L_x}{R_2 \cdot C_3} = \frac{0,0223}{8,2 \cdot 10^{-9} \cdot 10^3} = 2,7 \text{ кОм};$$

$$R_3 = R_2 \cdot \frac{R_4}{R_x} = 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{2,72 \cdot 10^3}{1,82} = 1,495 \text{ МОм};$$

$$C_3 = \frac{Q_x}{\omega \cdot R_3} = \frac{769}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^3 \cdot 1,495 \cdot 10^6} = 8193 \text{ нФ}.$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 7

1 Визначити повний комплексний опір споживача Z_x згідно схеми, яка наведена на рисунку 7.2, а також його активну та реактивну складові, якщо за результатами вимірювань показ амперметра дорівнює $4,5 \text{ А}$, вольтметра – 90 В , ватметра – 295 Вт .

2 Записати результат опосередкованого вимірювання добротності Q_x котушки індуктивності для послідовної схеми заміщення, якщо в процесі вимірювання були отримані такі результати: $R = 141 \text{ Ом}$, $\Delta_{R,zp} = 0,003 \text{ Ом}$, $L = 0,35 \text{ Гн}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $\delta_{L,zp} = \pm 0,1\%$, $\Delta_{f,zp} = \pm 0,1 \text{ Гц}$.

3 Записати результат опосередкованого вимірювання добротності $tg\delta_x$ конденсатора для послідовної схеми заміщення, якщо в процесі вимірювання були отримані такі результати: $R = 0,2 \text{ Ом}$, $\Delta_{R,zp} = \pm 0,5\%$, $C = 400 \text{ мкФ}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $\delta_{f,zp} = \pm 0,25 \%$, $\Delta C = \pm 4,5 \text{ мкФ}$.

4 Вибрати ватметр, вольтметр та амперметр і схему їх увімкнення для опосередкованого вимірювання індуктивності L_X та добротності Q_X котушки індуктивності з параметрами: $L_X = 1 \cdot 10^{-3} \text{ мГн}$, $f = 10^3 \text{ Гц}$, $I_{\text{дон}} = 1000 \text{ мА}$, $R_L = 0,1 \text{ Ом}$.

5 Вибрати ватметр, вольтметр та амперметр і схему їх увімкнення для опосередкованого вимірювання ємності C_X та тангенса кута втрат $\text{tg}\delta_X$ конденсатора з параметрами: $C_X = 0,002 \text{ мГн}$, $f = 49,5 \text{ Гц}$, $U_{\text{дон}} = 150 \text{ В}$, $\text{tg}\delta_X = 5 \cdot 10^{-5}$.

6 Визначити взаємну індуктивність M_X двох котушок при вимірюванні методом амперметра і вольтметра. При узгодженому з'єднанні двох котушок показання вольтметра $3,85 \text{ В}$, при зустрічному їх з'єднанні – $3,54 \text{ В}$, а показ амперметра в обох випадках дорівнює $0,49 \text{ А}$. Частота струму у електричному колі дорівнює 100 Гц .

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 7

1. Яке призначення фарадметрів?

- 1 для вимірювання частоти
- 2 для вимірювання ємності
- 3 для вимірювання кута зсуву фаз
- 4 для вимірювання добротності котушки

2. За допомогою яких приладів реалізують методи безпосередньої оцінки для вимірювання параметрів R , C , L ?

- 1 за допомогою електронних перетворювачів
- 2 за допомогою амперметрів, вольтметрів та ватметрів
- 3 за допомогою електромеханічних і електронних вимірювачів R , C , L
- 4 за допомогою цифрових вимірювачів R , C , L

3. За яким аналітичним виразом визначається взаємна індуктивність двох котушок за методом амперметра і вольтметра?

1. $L_X = \frac{X}{\omega} = \frac{1}{2\pi f \cdot I_{PA}^2} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}$
2. $M_{1,2} = \frac{U_2}{\omega \cdot I_1}$

$$3. M_{1,2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{PV}}{I_{PA}}\right)_{o\delta}^2 - \left(\frac{P_{PW}}{I_{PA}^2}\right)_{o\delta}^2} - \sqrt{\left(\frac{U_{PV}}{I_{PA}}\right)_3^2 - \left(\frac{P_{PW}}{I_{PA}^2}\right)_3^2}}{4 \cdot \omega}$$

$$4. Q = \frac{\omega \cdot L_X}{R} = \frac{1}{P_{PW}} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}$$

4. За яким аналітичним виразом визначається індуктивність котушки за методом амперметра, вольтметра і ватметра?

$$1. Q = \frac{\omega \cdot L_X}{R} = \frac{1}{P_{PW}} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}$$

$$2. L_X = \frac{C_{3P1} - C_{3P2}}{\omega \cdot C_{3P1} \cdot C_{3P2}}$$

$$3. M_{1,2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{PV}}{I_{PA}}\right)_{o\delta}^2 - \left(\frac{P_{PW}}{I_{PA}^2}\right)_{o\delta}^2} - \sqrt{\left(\frac{U_{PV}}{I_{PA}}\right)_3^2 - \left(\frac{P_{PW}}{I_{PA}^2}\right)_3^2}}{4 \cdot \omega}$$

$$4. L_X = \frac{X}{\omega} = \frac{1}{2\pi f \cdot I_{PA}^2} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}$$

5. В яких приладах реалізований резонансний метод вимірювання параметрів елементів кіл змінного струму?

- 1 куметрах
- 2 ватметрах
- 3 фарадметрах
- 4 частотомірах

6. За яким аналітичним виразом визначається ємність конденсатора за методом амперметра, вольтметра і ватметра?

$$1. C_X = C_{N1} - C_{N2}$$

$$2. L_X = \frac{X}{\omega} = \frac{1}{2\pi f \cdot I_{PA}^2} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}$$

$$3. C_X = \frac{1}{\omega X} = \frac{I_{PA}^2}{2\pi f} \cdot \frac{1}{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}}$$

$$4. Z_X = \frac{U_{PV}}{I_{PA}} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

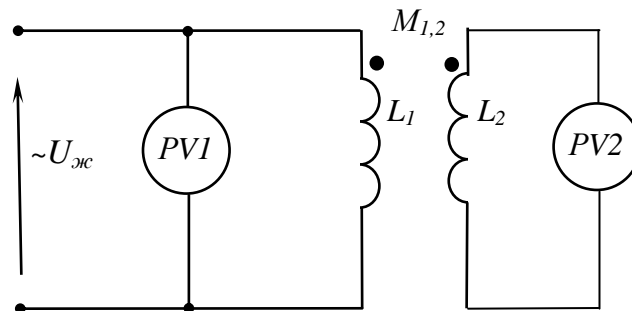
7. За яким аналітичним виразом визначається індуктивність котушки за методом амперметра, вольтметра і ватметра?

$$\begin{aligned}
 1 \quad C_X &= C_{N1} - C_{N2} \\
 2 \quad L_X &= \frac{X}{\omega} = \frac{1}{2\pi f \cdot I_{PA}^2} \cdot \sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2} \\
 3 \quad C_X &= \frac{1}{\omega X} = \frac{I_{PA}^2}{2\pi f} \cdot \frac{1}{\sqrt{U_{PV}^2 \cdot I_{PA}^2 - P_{PW}^2}} \\
 4 \quad Z_X &= \frac{U_{PV}}{I_{PA}} = \sqrt{R^2 + X^2}
 \end{aligned}$$

8. За яким аналітичним виразом визначається взаємна індуктивність двох котушок за методом амперметра і вольтметра?

$$\begin{aligned}
 1 \quad Q_x &= \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_x} = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \omega \cdot C_3 \cdot R_3; \\
 2 \quad M_{1,2} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{PV}}{I_{PA}}\right)_{od}^2 - \left(\frac{P_{PW}}{I_{PA}^2}\right)_{od}^2} - \sqrt{\left(\frac{U_{PV}}{I_{PA}}\right)_3^2 - \left(\frac{P_{PW}}{I_{PA}^2}\right)_3^2}}{4 \cdot \omega} \\
 3 \quad L_X &= \frac{C_{3P1} - C_{3P2}}{\omega \cdot C_{3P1} \cdot C_{3P2}} \\
 4 \quad M_{1,2} &= \frac{E_2}{\omega \cdot I_1} = \frac{U_{PV}}{2\pi \cdot f \cdot I_{PA}}
 \end{aligned}$$

9. Яке призначення наведеної схеми вимірювання?



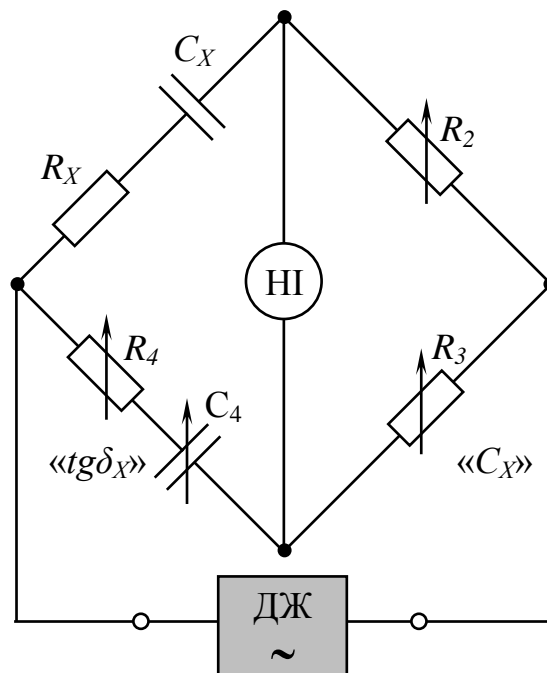
- 1 схема вимірювання взаємної індуктивності методом двох вольтметрів
- 2 схема вимірювання взаємної індуктивності методом «PA-PV-PW»
- 3 схема вимірювання індуктивності котушки куметром
- 4 схема опосередкованого вимірювання складових комплексного опору методом «PA-PV-PW»

10. За результатами вимірювань методом «PA-PV-PW» покази приладів дорівнюють: амперметра 4,5 А, вольтметра 90 В, ватметра 295 Вт. Результат визначення повного комплексного опору споживача дорівнює 13,8 Ом.

Чи вірний результат вимірювання повного комплексного опору споживача?

- 1 не вірний результат
- 2 вірний результат

11. Для наведеної мостової схеми вимірювання параметрів R, L, C складіть умову рівновагу та оберіть вірну відповідь.



$$1 \quad R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}$$

$$2 \quad (R_x + j\omega \cdot L_x) \cdot \frac{R_3}{j\omega \cdot C_3} = R_2 \cdot R_4 \left(R + \frac{1}{j\omega \cdot C_3} \right)$$

$$3 \quad Q_x = \frac{R_x}{\omega \cdot L_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_3 \cdot R_3}$$

$$4 \quad \left(R_x + \frac{1}{j\omega \cdot C_x} \right) \cdot R_3 = \left(R_4 + \frac{1}{j\omega \cdot C_4} \right) \cdot R_2$$

ЧАСТИНА 3. ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

РОЗДІЛ 8.

ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ

8.1 Загальні положення

Вимірювання неелектричних величин досягло високого розвитку і є найбільшою та найрозвиненою галуззю інформаційно-вимірювальної техніки, а виробництво приладів для вимірювання різних неелектричних величин фізичної природи є основною частиною продукції приладобудування. Велика кількість вимірюваних неелектричних величин, розкиданість досліджуваних об'єктів у просторі, необхідність автоматизації керування для централізованого отримання вимірювальної інформації, опрацювання цієї інформації та вироблення сигналів для зворотної дії на об'єкт дослідження зумовлюють використання переважно електричних методів вимірювань неелектричних величин, так як електричні сигнали найпридатніші як для вимірювань, так й для опрацювання та передавання на відстані.

В сучасній промисловості, науці, енергетиці, на транспорті та в інших галузях народного господарства має місце надзвичайно швидке зростання кількості фізичних величин, які необхідно вимірювати та контролювати. Фахівцям необхідно вміти вимірювати чи контролювати понад 2000 величин, а існуючі методи і засоби дають можливість вимірювати лише 400...500 таких величин. При цьому кількість неелектричних величин, які необхідно вимірювати, значно перевищує кількість вимірюваних електричних і магнітних величин.

Таким чином, широкий спектр вимірюваних неелектричних величин, недостатнє вивчення методів їх вимірювання, метрологічна незабезпеченість визначають особливості вимірювання таких величин, а саме, *при вимірюванні неелектричних величин широко застосовуються електричні методи вимірювання, тобто виконується «електрифікація» таких вимірювань – перетворення неелектричної величини в електричну.*

Це зумовлює наявність *первинного вимірювального перетворювача* (ПВП) в структурі засобу вимірювання неелектричних величин, що здійснює попереднє перетворювання досліджуваної неелектричної величини у функціонально пов'язану з нею електричну величину, *вторинного вимірювального приладу* (ВВП), а також *пристроїв їх спряження* – лінії зв'язку вимірювальні підсилювачі, пристрої гальванічної розв'язки вимірювальних кіл, пристрої коригування похибок.

Залежно від типу первинного вимірювального перетворювача і вигляду його вихідного інформативного параметра використовуються ті чи інші технічні засоби електровимірювальних приладів. У більшості випадків апаратна частина вторинних приладів для вимірювання неелектричних величин істотно не відрізняється від приладів для вимірювання електричних величин.

Суттєвою відмінністю є тільки алгоритм роботи приладу, який визначається алгоритмом виконання вимірювальної процедури тієї чи іншої фізичної величини.

Оскільки вихідними інформативними параметрами перетворювачів є напруга, струм, опір, ємність або індуктивність, то вторинними вимірювальними приладами є прилади для вимірювання відповідних електричних величин. При цьому, як правило, вторинні прилади електричних величин проградуйовані з урахуванням функції перетворення первинного вимірювального перетворювача в одиницях вимірюваної неелектричної величини.

Узагальнена структурна схема електричного приладу для вимірювань неелектричних величин наведена на рисунку 8.1.

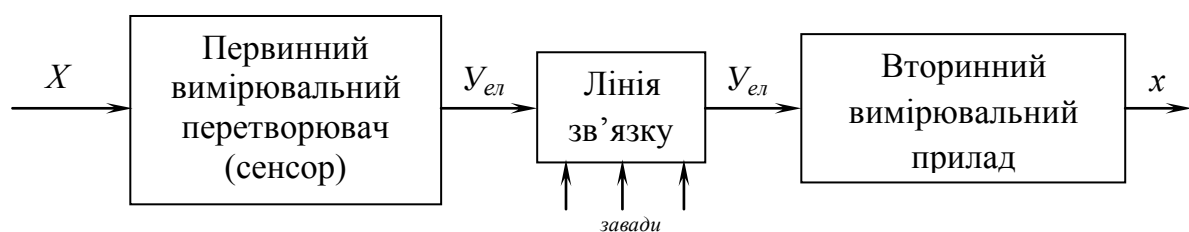


Рисунок 8.1 - Узагальнена структурна схема електричного приладу для вимірювань неелектричних величин

Вимірювана неелектрична величина X надходить на вхід первинного вимірювального перетворювача (сенсора) (ПВП), де перетворюється в пропорційну їй електричну величину X_{el} , яка по лінії зв'язку (ЛЗ) подається на вторинний вимірювальний прилад (ВВП). На лінію зв'язку, довжина якої може бути досить значною, в загальному випадку, впливають завади, які можуть спотворити сигнал X_{el} . Показ x ВВП, який визначений в одиницях вимірювальної величини X , може бути використаний для візуального спостереження або подальшого опрацювання у вимірювально-інформаційній системі.

Слід відзначити, що у ПВП фактично відбувається перетворення енергії одного виду (механічної, теплової, світлової) в іншу (електричну). Під час такого перетворення неелектричної величини реалізуються два принципи:

- вплив на електричні параметри ПВП – *пасивні ПВП*;
- генерування електричного сигналу – *активні ПВП*.

Для пасивних ПВП притаманна зміна електричного параметра перетворювача – електричного опору, ємності, індуктивності, через механічний контакт або використання фізичних залежностей. До таких ПВП, які мають назву *параметричні*, належать резистивні, ємнісні, індуктивні та інші перетворювачі.

Для активних ПВП притаманна генерація активними елементами електричних сигналів – струм, напруга, заряд, при перетворенні механічної, теплової, світлової або хімічної енергії в електричну. До таких ПВП, які мають назву *генераторні*, належать термоелектричні, п'єзоелектричні, гальваноманітні та інші ПВП.

Висновок: вимірювання неелектричних величин фактично зводиться до вимірювання електричних величин: струму, напруги, ЕРС, опору, ємності, індуктивності, частоти, інтервалу часу, фази, з якими вимірювані неелектричні величини пов'язані відомими функціональними залежностями. Електричні величини вимірюють аналоговими і цифровими вторинними вимірювальними приладами. У ВВП над електричним сигналом може здійснюватись додаткові операції: підсилення до необхідного рівня, лінеаризація функції перетворення і корекція похибок ПВП та реєстрація. Важливою задачею при вимірюваннях

неелектричних величин є передача інформації від ПВП до ВВП по лінії зв'язку, на яку впливають завади і можуть внести істотну похибку в результат вимірювання. В самій ЛЗ можуть відзначатись втрати вимірювальної інформації. При малих рівнях вихідних сигналів ПВП до складу приладу вводяться вимірювальні підсилювачі, які можуть бути суміщені з перетворювачами. При передачі сигналів на значні відстані (до десятків та до сотень кілометрів) використовуються телевимірювальні інформаційні системи.

8.2 Параметричні вимірювальні перетворювачі

Як було зазначено в пункті 8.1, у параметричних вимірювальних перетворювачах неелектрична величина перетворюється у приріст параметра електричного кола (R, L, C, M), тому особливістю роботи таких перетворювачів є потреба в додатковому джерелі енергії.

Розглянемо основні типи параметричних вимірювальних перетворювачів.

8.2.1 Резистивні перетворювачі

Параметричні перетворювачі, в яких вихідною величиною є приріст електричного опору, мають назву *резистивні*.

До цієї групи належать реостатні перетворювачі, перетворювачі контактного опору, тензорезистори, терморезистори, фоторезистори, магніторезистори, кондуктометричні (резистивні електрометричні) перетворювачі.

Реостатні перетворювачі – це перетворювачі, які виконані у вигляді реостата, повзунок якого переміщується під дією вхідної неелектричної величини – рисунок 8.2.

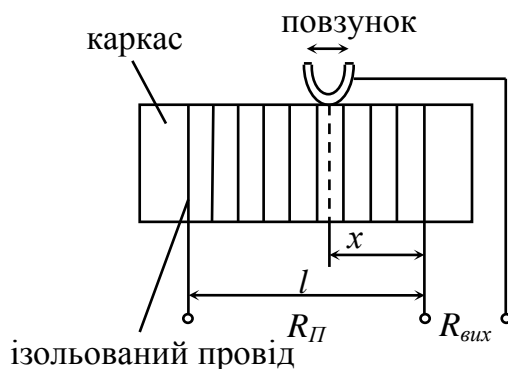


Рисунок 8.2 – Схема реостатного перетворювача

Вихідною величиною є електричний опір $R_{вих}$, значення якого зумовлене положенням повзунка. Реостатний перетворювач лінійних переміщень складається із стержневого, трубчатого або пластинчатого каркасу, на який намотаний з певним кроком манганіновий, константановий або вольфрамовий провід. Повзунок із фосфористої бронзи або платиноїридію переміщується по зачищеній від ізоляції та відполірованій контактній поверхні обмотки.

Такі реостатні перетворювачі поступального руху та обертального руху є найпоширенішими. Якщо перетворювач працюватиме в умовах підвищених температур, то провід виконаний з нікель-хромового чи залізо-хромового сплаву.

Характеристика градування реостатного перетворювача лінійних переміщень має вигляд

$$R_{вих} = f(x) = \frac{R_{\Pi}}{l} x, \quad (8.1)$$

де R_{Π} – повний опір перетворювача;

l – довжина перетворювача;

x – лінійне переміщення.

Найпоширеніші реостатні перетворювачі у пристроях для вимірювань лінійних і кутових переміщень та прискорень, а також рівня, сили, тиску та різниці тиску, так як їх можна попередньо перетворити в переміщення.

Перетворювачі контактного опору побудовані на залежності перехідного опору між стиковими електропровідними елементами від зусиль їх стискання або деформації - рисунок 8.3.

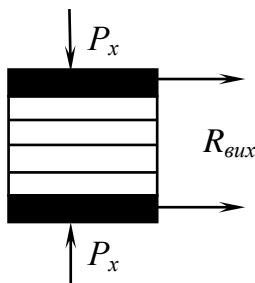


Рисунок 8.3 – Схема перетворювача контактної опору

Як електропровідні елементи для таких перетворювачів використовують електропровідний папір, гуму та інші електропровідні матеріали з питомим об'ємним опором $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, оскільки перехідний опір набагато більший за об'ємний опір контактних елементів. Одним з перших представником таких перетворювачів став вугільний мікрофон.

Характеристика градуювання перетворювача контактного опору має вигляд

$$R_{\text{вих}} = R_0 \cdot \left(1 + \frac{k}{P_x} \right), \quad (8.2)$$

де k – коефіцієнт перетворення.

Тензорезистори (тензометричні перетворювачі) – це параметричні перетворювачі, принцип дії яких оснований на явищі тензоефекту.

Суть тензоефекту полягає в зміні активного опору провідників і напівпровідників при їх механічній деформації. Отже, вхідною величиною тензорезистора є відносна, ε_l , або абсолютна, Δl , деформація, а вихідною – відносна, ε_R , або абсолютна, ΔR , зміна опору тензорезистора, які пов'язані між собою *коефіцієнтом тензочутливості* $k = \varepsilon_R / \varepsilon_l$.

Як відомо, опір R провідника залежить від його довжини l , площі поперечного перерізу S і питомого опору r згідно формулою

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}. \quad (8.3)$$

Під дією зовнішніх навантажень провідник деформується у межах пружної деформації, як наслідок, змінюються геометричні розміри l та S , а також структура матеріалу, зміна якої призводить до зміни r . Все це призводить до зміни опору провідника R на величину ΔR , яка, в остаточному результаті, є функцією його деформації

$$\Delta R = \frac{k \cdot R}{l} \cdot \Delta l. \quad (8.4)$$

Широко застосовуються нині дротяні та фольгові тензорезистори, які наклеюються на об'єкт дослідження, так щоб вони разом із ним зазнавали деформації стискання або розтягування.

Дротовий тензорезистор має підкладку з тонкого паперу чи лакової плівки, на котру наклеєний тензочутливий елемент – тонкий дріт. До кінців дроту приєднані зварюваннями виводи з тонкого мідного дроту. Зверху перетворювач покрито шаром лаку - рисунок 8.4.

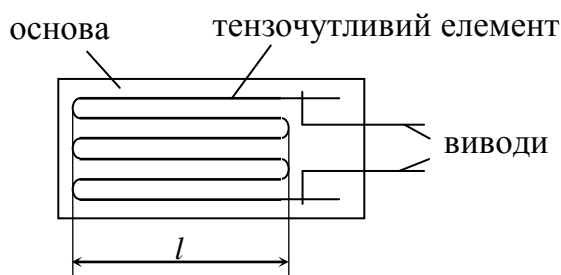


Рисунок 8.4 – Схема дротяного тензорезистора

Фольговий тензорезистор містить тонку стрічку з фольги завтовшки 0,01...0,02 мм, на якій частина матеріалу вибрана так, що її частина, яка залишилась, утворює плоску решітку з виводами. Цю решітку закріплюють між двома плівками з лаку - рисунок 8.5.

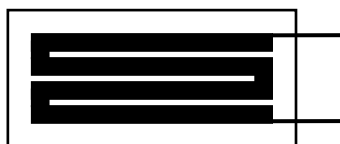


Рисунок 8.5 – Схема фольгового тензорезистора

Поширені плівкові тензорезистори, в яких чутливий елемент нанесений методом вакуумної сублимації з подальшою конденсацією на плівку. Для виготовлення плівкових тензорезисторів застосовують як металеві (титано-алюмінієвий сплав), так й напівпровідникові (германій, кремній) матеріали.

Важливою перевагою як фольгових, так і плівкових тензорезисторів є те, що під час виготовлення можливо передбачити будь-який рисунок їх решітки,

завдяки чому їх застосовують для досліджень механічних напружень деталей різної конфігурації.

Принципово нові можливості у розвитку тензорезисторів на основі напівпровідникових чутливих елементів відкрилися з розробкою і дослідженням структур типу «кремній на діелектрику». Із них найбільш вивчена і технологічно освоєна структура «кремній на сапфірі». Це тонка монокристалічна плівка кремнію, вирощена на монокристалічній сапфіровій підкладці з певною кристалографічною орієнтацією. Такі перетворювачі мають хороші пружні властивості, малу похибку гістерезису, широкий діапазон вимірюваних деформацій.

Тензорезистори всіх типів широко застосовуються при вимірюванні деформацій, зусиль, тисків та механічних моментів.

Терморезистори – це теплові параметричні перетворювачі, принцип дії яких оснований на властивості речовини змінювати свій опір при зміні температури. Для вимірювання температури терморезистор необхідно помістити в середовище, температуру якого необхідно виміряти.

Чутливими елементами таких перетворювачів є провідники та напівпровідники. Перетворювачі з провідниковими чутливими елементами мають назву *термометри опору* і матеріалами для їх виготовлення є платина, мідь та нікель. Існують термометри опору трьох типів: термоопори платинові (ТОП), термоопори мідні (ТОМ) і термоопори нікелеві (ТОН).

Конструктивно ТОП – це перетворювач, чутливий елемент, якого виконаний зі стрічкової платини, навитої на трубчастий ізоляційний каркас із спеціального скла. Для захисту від механічних пошкоджень перетворювач покритий захисною оболонкою.

Конструктивно ТОМ – це перетворювач, чутливий елемент якого виконаний як безкаркасна обмотка з мідного ізольованого дроту та зверху покрита фторопластовою плівкою. Для забезпечення потрібної механічної міцності обмотку поміщають у тонкостінну металеву гільзу та засипають керамічним порошком і герметизують.

Характеристика градуювання для терморезисторів має вигляд

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T_{\text{середовища}}) \quad (8.5)$$

де R_0 – опір чутливого елемента при температурі 0°C , Ом;

α – температурний коефіцієнт опору, $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$.

Термоопори платинові використовуються в діапазоні температур від 0°C до плюс 1100°C , термоопори мідні - від плюс 50°C до плюс 250°C , термоопори нікелеві - від мінус 60°C до плюс 180°C .

Чутливий елемент напівпровідникового терморезистора – *термістора* виготовляється з окислів різних металів: міді, кобальту, марганцю. Із збільшенням температури середовища опір термісторів зменшується, а характеристика градуювання має вигляд

$$R_t = Ae^{\frac{B}{T}}, \quad (8.6)$$

де A, B – сталі коефіцієнти, які залежать від матеріалу і технології виготовлення термістора.

Термістори використовуються в діапазоні температур від мінус 200°C до плюс 600°C . Їх чутливість у $5 \dots 10$ разів перевищує чутливість металевих термоопорів, але до недоліків належать не лінійність характеристики градуювання, великий розкид параметрів при вимірюваннях, а також старіння і нестабільність параметрів у часі.

Фоторезистори – це фотоелектричні параметричні перетворювачі, принцип дії яких оснований на явищі внутрішнього фотоефекту. Суть внутрішнього фотоефекту полягає у переміщенні звільнених під дією світлового потоку носіїв заряду (електронів і дірок) усередині твердого тіла (без виходу назовні), що призводить до зміни електропровідності тіла. За конструкцією фоторезистор містить нанесений на скляну пластину, виготовлену із селеніду кадмію, сірчаного свинцю, сірчаного кадмію, та яка має площу від одиниць до сотень квадратних міліметрів, шар напівпровідника з електродами, що входять у нього.

Характеристика градуювання фоторезисторів має вигляд

$$G = \Phi \cdot a, \quad (8.7)$$

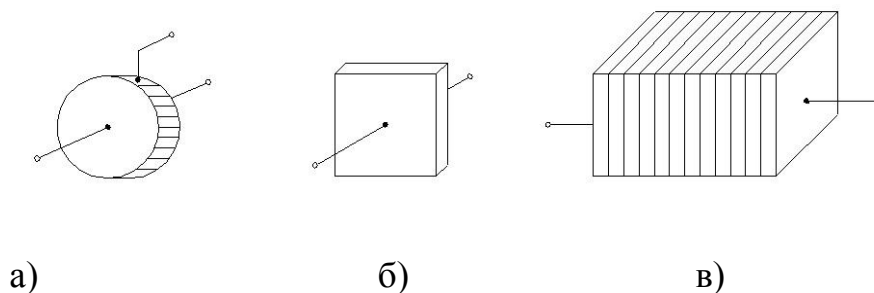
де G – електропровідність;

Φ – світловий потік;

a – коефіцієнт не лінійності енергетичної характеристики фотопровідності.

Висока чутливість, можливість одержання значних фотострумів без застосування додаткових підсилювачів і практично необмежений строк служби визначають основну перевагу фоторезисторів. До недоліків цих перетворювачів слід віднести їх інерційність.

Магніторезистори – це перетворювачі, принцип дії яких оснований на магнітоелектричному ефекті, згідно якого внутрішній опір напівпровідників змінюється внаслідок відхилення траєкторії носіїв заряду від лінійної під впливом зовнішнього магнітного поля. Кількісно магнітоелектричний ефект проявляється по-різному і залежить від матеріалу магніторезистора та його форми. В провідникових матеріалах такий ефект проявляється слабо, значно сильніше він проявляється в напівпровідниках. На рисунку 8.6 наведений зовнішній вигляд магніторезисторів різних форм.



а - магніторезистор типу «диск Корбіно»;

б - магніторезистор прямокутної форми;

в - магніторезистор прямокутної форми з провідниковими прокладками

Рисунок 8.6 - Зовнішній вигляд магніторезисторів різних форм

У слабких магнітних полях магнітоелектричний ефект проявляється найсильніше, тому то застосовується конструкція магніторезистора типу «диск Ко-

рбіно» (рисунок 8.6.а), коли один електрод розміщується в центрі, а другий – на торці. Внутрішній опір магніторезистора малий ($0,1 \dots 1,0 \text{ Ом}$), залежність відносної змінної питомого опору від величини магнітної індукції нелінійна у досить широкому діапазоні її зміни.

У магніторезисторах прямокутної форми (рисунок 8.6.б) магнітоелектричний ефект проявляється менш сильно, вони мають значно більший внутрішній опір (до сотень Ом), а також ширший діапазон сталої чутливості.

Збільшення магнітоелектричного ефекту стало можливим у конструкціях магніторезисторів, які складаються з ряду прямокутних напівпровідникових пластин, з'єднаних послідовно і розділених провідниковими прокладками – рисунок 8.6.в.

Магніторезистори застосовують переважно для вимірювального перетворення магнітної індукції постійних і змінних магнітних полів у діапазоні $0,3 \dots 10 \text{ Тл}$ в зміну електричного опору.

Кондуктометричні (резистивні електрометричні) перетворювачі – це електрохімічні параметричні перетворювачі, які базуються на використанні залежності їх опору від складу і концентрації електроліту за виразом

$$R = \frac{K_{\Gamma}}{\gamma}, \quad (8.8)$$

де K_{Γ} – коефіцієнт перетворення, що залежить від співвідношення геометричних розмірів;
 γ – провідність електроліту.

Кондуктометричні перетворювачі використовуються для вимірювання питомої електропровідності електролітів для визначення концентрації розчинів. Чутливими елементами є два електроди, які занурені в електроліт, опір між ними залежить від концентрації розчину. Для зменшення похибки від поляризації і забруднення електродів застосовуються чотириелектродні кондуктометричні перетворювачі з двома струмовими 1 і двома потенціальними 2 виводами, з яких знімається напруга – рисунок 8.7.

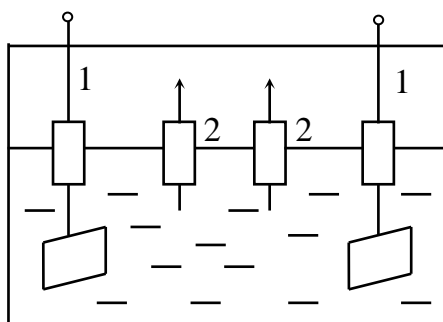


Рисунок 8.7 – Схема чотириелектродного кондуктометричного перетворювача

Крім визначення концентрації електролітів кондуктометричні перетворювачі застосовуються для вимірювання механічних переміщень і деформацій, а також вологості газів та деревини.

8.2.2 Ємнісні перетворювачі

Ємнісні перетворювачі – це електричні конденсатори, ємність яких змінюється внаслідок зміни під дією вимірюваної неелектричної величини відстані між електродами, площі перекриття електродів або діелектричної проникності середовища, що міститься між електродами.

В ідеальному випадку ємність плоского конденсатора визначається за виразом

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d}, \quad (8.9)$$

де ε_0 – діелектрична стала; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

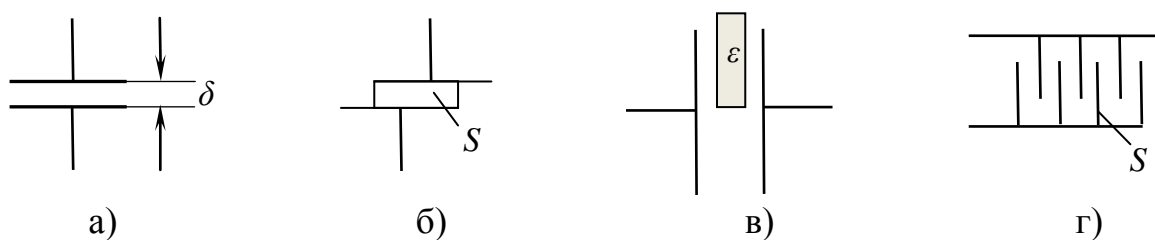
ε – відносна діелектрична проникність;

S – площа електродів;

d – відстань між електродами.

Аналіз виразу (8.9) показує, що ємність плоского конденсатора прямо пропорційно залежить від відносної діелектричної проникності середовища та зворотно пропорційно залежить від відстані між електродами..

Рисунок 8.8 пояснює принцип побудови ємнісних перетворювачів.



а - перетворювач зі зміною відстані між пластинами конденсатора;
 б та в - перетворювачі зі зміною площі перекриття між електродами конденсатора;

г - перетворювач зі зміною діелектричної проникності між електродами

Рисунок 8.8 – Схеми ємнісних перетворювачів

Тому то, всі фізичні величини, які безпосередньо або через допоміжні чинники будуть впливати на зміни величин ϵ , S та d , можна виміряти за допомогою ємнісних перетворювачів

Розглянемо, перетворювачем яких фізичних величин може бути ємнісний перетворювач:

- зміна діелектричної проникності ϵ .

Величина ϵ має різні значення для різних речовин. Отже, цю особливість можна використовувати для визначення виду речовини, що знаходиться між електродами ємнісного перетворювача. Якщо є суміш двох речовин, значення ϵ_1 і ϵ_2 яких відомі, то, вимірюючи значення суміші ϵ_C , можна визначити її процентний склад. Наприклад, відносна діелектрична проникність нафти $\epsilon_{нафти} = 3$, а води $\epsilon_{води} = 81$. Отже, найменші домішки води у нафті будуть різко збільшувати загальну діелектричну проникність ϵ_C . На цій особливості ґрунтується будова ємнісних вимірювачів вологості. Загалом міжелектродний простір може бути тільки частково заповнений якою-небудь твердою, сипкою або рідкою речовиною. Якщо відома діелектрична проникність цієї речовини, то за величиною вимірної ємності можна визначити ступінь заповнення міжелектродного простору в лінійних мірах площі. На цій основі побудовані вимірювачі пе-

реміщення (твердих) або рівнів (сипкого і рідкого) середовищ у закритих, недоступних для безпосереднього спостереження резервуарах;

- зміна площі S електродів.

Площа електродів S може змінюватись або при лінійних переміщеннях однієї з пластин відносно іншої, або при їх відносному повертанні. Таким чином, на цій основі створені ємнісні перетворювачі лінійних і кутових переміщень. Пластини можуть мати значні розміри, до 100 мм, складатись із спарених секцій, тому то ємнісні перетворювачі такого типу придатні для вимірювання порівняно великих переміщень і кутів від 0 до 360 °. Якщо ємнісний перетворювач виконати так, що вільному відносному лінійному або кутовому переміщенню пластин будуть перешкоджати відповідні пружини із наперед заданими характеристиками, то він буде придатний для вимірювання сил чи моментів, що їх обертають;

- зміна відстані d між електродами. Таку відстань називають зазором, а ємність перетворювача змінюється обернено пропорційно зазору d . На рисунку 8.9 наведена схема ємнісного перетворювача зі зміною зазору між електродами.

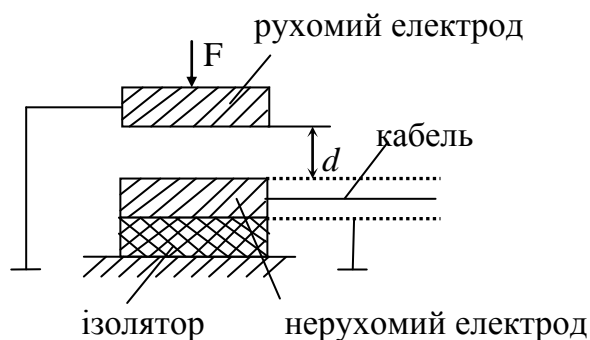


Рисунок 8.9 – Схема ємнісного перетворювача

Характеристика градуювання ємнісного перетворювача має вигляд

$$C = f(d) = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S \cdot \frac{1}{d}. \quad (8.10)$$

Ємнісні перетворювачі використовуються для вимірювання лінійних та кутових переміщень, рівня рідини, вологості сипких матеріалів, а сумісно з еле-

ктромеханічними перетворювачами – для вимірювання тиску, сили, прискорення та вібрацій.

8.2.3 Індуктивні перетворювачі

Індуктивні перетворювачі – це котушка індуктивності з феромагнітним осердям (дроселем), повний опір якої змінюється при взаємному відносному переміщенні елементів магнітопроводу. Індуктивність котушки L пов'язана з зазором δ , тобто з довжиною повітряного проміжку між рухомою і нерухомою частинами магнітопроводу, і ефективною площею S повітряного проміжку залежністю

$$L = \frac{w^2}{R_M} = \frac{w^2}{R_{M..m} + \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot S}}, \quad (8.11)$$

де R_M – повний магнітний опір кола;

w – кількість витків котушки;

$R_{M..m}$ – магнітний опір магнітопроводу;

μ_0 - магнітна стала; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

На рисунку 8.10 наведена схема індуктивного перетворювача із зміною розміру повітряного зазору.

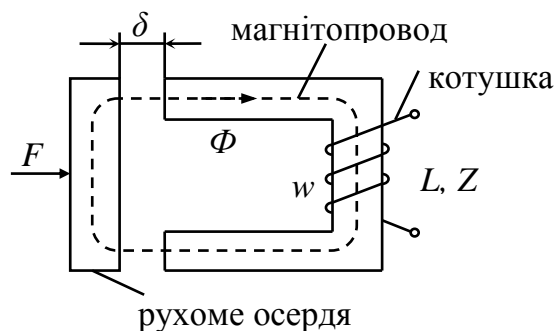


Рисунок 8.10 - Схема індуктивного перетворювача із зміною розміру повітряного зазору

Вихідною величиною індуктивного перетворювача є зміна індуктивності L котушки. Вхідною величиною перетворювача є переміщення рухомого осер-

дя, яке може виникати із-за дії неелектричної величини: сили, тиску, яке й призводить до зміни її повного опору Z .

Індуктивний перетворювач є нелінійним перетворювачем, так як залежність індуктивності від довжини зазору близька до гіперболічної. Значне покращення лінійності при одночасному збільшенні чутливості досягається в диференціальних перетворювачах із двома перетворювальними елементами, що мають загальну рухому частину – рисунок 8.11.

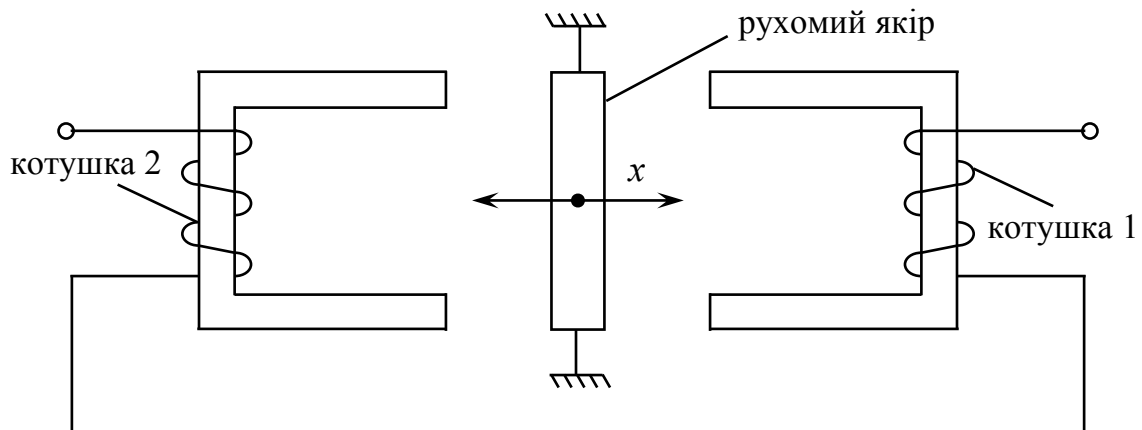


Рисунок 8.11 – Схема диференціального індуктивного перетворювача

В такому перетворювачі рухомий ярмак розміщений симетрично відносно обох осердь із початковим зазором δ . Магнітні опори для потоків, що створюються двома котушками, є однаковими. Зміни магнітних опорів, що відбуваються при переміщенні $\Delta\delta$ ярмака, мають протилежні знаки. При зустрічно-послідовному вмиканні їх сумарна індуктивність дорівнює

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \omega^2 \cdot S}{\delta - \Delta\delta} - \frac{\mu_0 \cdot \omega^2 \cdot S}{\delta + \Delta\delta} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega^2 \cdot S \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^2}. \quad (8.12)$$

Внаслідок того, що в знаменнику виразу (8.12) відношення $\Delta\delta/\delta$ знаходиться у квадраті, отже в диференціальному перетворювачі лінійність характеристики забезпечується в більш широких межах. Через це практично всі індуктивні перетворювачі виконуються диференціальними.

8.3 Генераторні вимірювальні перетворювачі

Генераторні вимірювальні перетворювачі – це первинні вимірювальні перетворювачі, в яких вхідна неелектрична величина перетворюється у вихідний сигнал, який має енергетичні властивості.

Розглянемо основні типи генераторних вимірювальних перетворювачів.

8.3.1 Індукційні перетворювачі

Принцип роботи таких перетворювачів ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції. Такі перетворювачі містять постійний магніт, між полюсами якого розташована рухома вимірювальна котушка – рисунок 8.12.

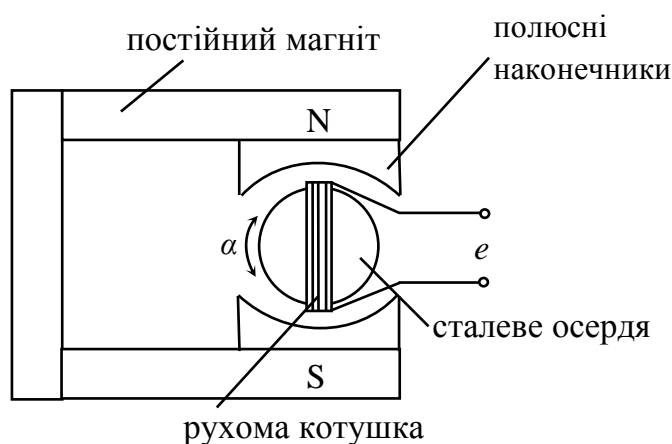


Рисунок 8.12 – Схема індукційного перетворювача

При лінійних або кутових переміщеннях вимірювальної котушки в магнітному полі в ній наводиться ЕРС, яка є функцією кута повороту α котушки

$$e = -B_z \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} \quad \text{або} \quad e = -B_z \cdot S_p \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \quad (8.13)$$

де B_z – індукція в робочому зазорі;

l – активна довжина вимірювальної котушки;

x, α – переміщення відповідно лінійне або кутове;

S_p – активна площа рамки.

Індукційні перетворювачі використовуються для вимірювання лінійної і кутової швидкостей, а також інших величин, функціонально пов'язаних із ними.

Перетворювачі цього типу, які призначені для вимірювання кутової швидкості і виконані у вигляді невеликих генераторів постійного чи змінного струмів, мають назву *тахогенератори*.

8.3.2 П'єзоелектричні перетворювачі

П'єзоелектричні перетворювачі – це перетворювачі, принцип дії яких оснований на явищах прямого та зворотного п'єзоефектів. Суть прямого п'єзоефекту полягає в електризації кристалів деяких діелектриків під дією механічних напружень, а зворотного ефекту - у виникненні механічної деформації кристала під дією електричного поля. До матеріалів, яким властивий п'єзоефект, належать кварц, сегнетова сіль, а також п'єзокераміка: титанат барію та цирконат свинцю.

На рисунку 8.13 наведена схема п'єзоелектричного перетворювача.

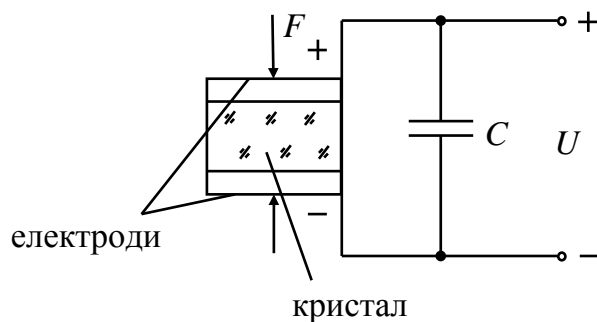


Рисунок 8.13 – Схема п'єзоелектричного перетворювача

Якщо на п'єзокристал діяти силою F , то на його гранях з'явиться заряд q , який пропорційний силі F

$$q = d_{11} \cdot F, \quad (8.14)$$

де d_{11} – п'єзоелектричний модуль, який залежить від матеріалу та його стану.

П'єзокристал разом з електродами утворюють конденсатор, ЕРС якого дорівнює

$$E = \frac{q}{C} = \frac{d_{11}}{C} \cdot F. \quad (8.15)$$

Вхідною величиною для п'єзоелектричного перетворювача є механічна сила, а вихідною – ЕРС. Характеристика градуювання п'єзоелектричного перетворювача має вигляд

$$U = f(F) = \frac{d_{11}}{C} \cdot F. \quad (8.16)$$

Головні переваги таких перетворювачів: малі габарити, висока надійність, простота конструкції, можливість вимірювати параметри, що швидко змінюються.

Недоліком п'єзоелектричного перетворювача є значні похибки під час вимірювання сталої сили, оскільки заряд, що з'явився на гранях п'єзокристалу, може стікати через вхідний опір вторинного приладу, тому то п'єзоелектричні перетворювачі доцільно застосовувати для вимірювання змінної сили.

8.3.3 Трансформаторні перетворювачі

Трансформаторні перетворювачі – це генераторні перетворювачі трансформаторного типу, у яких під дією вхідної величини змінюється взаємна індуктивність між його обмотками, що призводить до зміни вихідної напруги - рисунок 8.14.

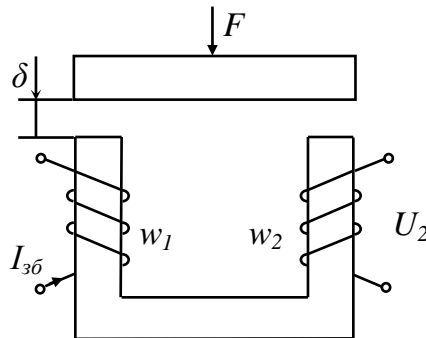


Рисунок 8.14 – Схема трансформаторного перетворювача

Принцип дії таких перетворювачів ґрунтується на залежності взаємоіндуктивності M між обмотками з кількістю витків w_1 і w_2 від магнітного опору R_M , який є функцією довжини повітряного проміжку δ . Величина M дорівнює

$$M = \frac{W_1 \cdot W_2}{R_M} \quad (8.17)$$

Вихідна напруга U_2 перетворювача визначається за формулою

$$U_2 = f(\delta) = \omega \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot I_{зб} \cdot \frac{1}{2\delta}, \quad (8.18)$$

де $I_{зб}$ - струм збурення.

8.3.4 Магнітопружні перетворювачі

Магнітопружний перетворювач – це феромагнітне осердя з однією або з двома обмотками, до якого прикладене механічне зусилля F – рисунок 8.15.

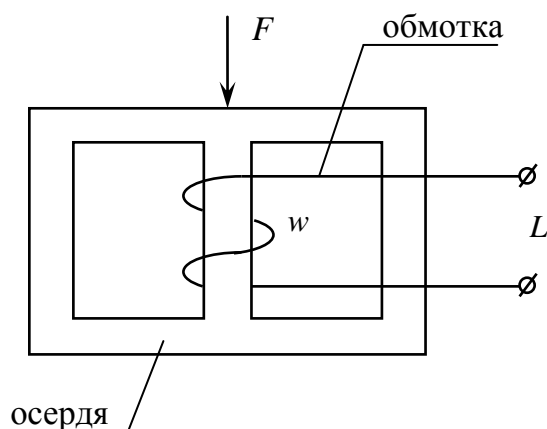


Рисунок 8.15 – Схема магнітопружного перетворювача

Це зусилля створює в осерді механічне напруження σ , яке призводить до зміни магнітної проникності μ і, відповідно, до зміни індуктивності L котушки індуктивності. Принцип дії таких перетворювачів оснований на явищі *магнітопружного ефекту*, суть якого полягає в зміні магнітної проникності під дією механічної пружної деформації. Якщо на намагнічене феромагнітне тіло діє зовнішня механічна сила F , то тіло деформується, домени змінюють свою орієнтацію і індукція у матеріалі змінюється. Явище має пружний характер – якщо силу зняти, то індукція B набуде попереднє значення. Якщо значення напруженості магнітного поля H стане, зміна індукції еквівалентна зміні магнітної проникності μ , оскільки $\mu = \frac{B}{H}$.

Основною характеристикою феромагнітного матеріалу, з погляду його магнітопружних властивостей, є *коефіцієнт магнітопружної чутливості* k_σ ,

який визначається як відношення відносної зміни магнітної проникності $\Delta\mu/\mu$ до відносної деформації $\Delta l/l$ феромагнітного тіла або механічного напруження σ . Отже, у магнітопружному перетворювачі відбуваються такі перетворення

$$F \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_M \rightarrow L, \quad (8.19)$$

де R_M – магнітний опір, Ом.

Матеріал для виготовлення магнітопружних перетворювачів – це електротехнічні сталі і пермалой. Магнітопружні перетворювачі використовуються для вимірювань великих сил ($10^5 \dots 10^6$ МПа), тисків та обертальних моментів.

8.3.5 Електретні перетворювачі

Електрет – це постійний наелектризований діелектрик із різнойменними полюсами, що має зовнішнє електричне поле, який тривало зберігає поляризацію після віддалення зовнішнього електричного поля і створює в навколишньому просторі електричне поле – рисунок 8.16.

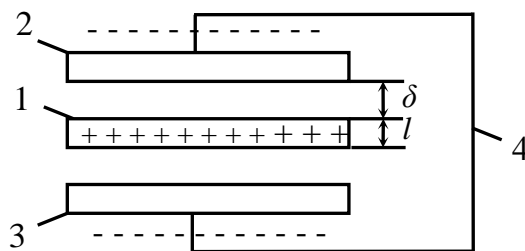


Рисунок 8.16 – Схема електретного перетворювача

Якщо електрет 1 розміщено між металевими пластинами 2 і 3, з'єднаними провідником 4, то на металевих електродах буде виникати наведений заряд, густина якого визначається за виразом

$$\sigma_u = \varepsilon_0 \cdot E = \frac{\sigma}{1 + \frac{\varepsilon \cdot S}{\varepsilon_0 \cdot l}}, \quad (8.20)$$

де δ - густина електричного заряду;

ε - діелектрична проникність;

l - товщина електрета;

S - площа матеріалу електрета;

E - напруга електричного поля, що створюється електретом.

Коли один із електретів коливається, то наведений на ньому заряд буде змінюватись і по зовнішньому колу протікає струм, який дорівнює

$$i = S \cdot \frac{d\sigma_u}{dt}. \quad (8.21)$$

Електретні перетворювачі можуть використовуватись для вимірювання параметрів вібрацій (електретний мікрофон, телефон), але більше застосування вони знайшли для перетворення тиску навколишнього повітря. Недолік електретних перетворювачів полягає в тому, що вони зазнають впливу температури. При нагріванні електрет втрачає внутрішню поляризацію і поверхневий заряд. Основним фактором, що ускладнює практичне застосування електретів, є складність одержання двох або кількох електретів із різною поверхневою густиною зарядів. І, зрештою, поверхнева густина заряду змінюється в часі, отже, електричне поле поза електретом нестабільне. У той самий час електрет має низьку вартість і просту конструкцію.

8.3.6 Термоелектричні перетворювачі

Принцип дії термоелектричних перетворювачів оснований на явищі термоелектричного ефекту Зеєбека, суть якого полягає у виникненні термо-ЕРС у колі, що містить два різнорідних провідника або напівпровідника, які мають назву *термоелектроди*, якщо температура місця з'єднання електродів (робочий кінець перетворювача) і температура вільних (холодних) кінців неоднакові. Чувливий елемент термоелектричного перетворювача, тобто пару термоелектродів, називають *термопарою*.

Матеріалами термоелектродів термопар є сплави хромелю, копелю, алюмелю, вольфрамренію, платинородію, а також платина, мідь і залізо. Від назви теромелектродів походить назва самого термоперетворювача, наприклад, перетворювач типу ТХА має електроди з хромелю та алюмелю.

Термоперетворювачі застосовують для вимірювання температур у межах від мінус 270°C до плюс 2200°C – таблиця 8.1.

Таблиця 8.1 – Типи термопар

Тип термопари	Матеріали термоелектродів	Діапазон вимірювання, °C
ТХА	Хромель – Алюмель	мінус 270...плюс 1000
ТХК	Хромель – Копель	мінус 200...плюс 600
ТПП	Платинородій	мінус 50...плюс 1700
ТВР	Вольфрам - реній	0...плюс 2200

8.3.7 Фотоелектричні перетворювачі

В основу будови генераторних фотоелектричних перетворювачів покладено явище зовнішнього фото ефекту. Суть зовнішнього фото ефекту полягає в емісії (випусканні) електронів на поверхні фотокатода у вакуум під дією світлового потоку. Кванти світла, що досягають фото чутливої поверхні катода, викликають емісію фотоелектронів, які під дією зовнішнього електричного поля створюють фотострум. На цьому принципі побудовані електровакуумні фотоелементи, іонні фотоелементи та фотоелектричні помножувачі.

Електровакуумний (електронний або іонний) фотоелемент є діодом, у якого на внутрішню поверхню скляного балону нанесено фотокатод у вигляді тонкого шару речовини, з якого відбувається фотоемісія. Анодом є металеве кільце, що не заважає світлу потрапляти на фотокатод. В електронних фотоелементах створено високий вакуум, а в іонних знаходиться інертний газ, наприклад, аргон, під тиском в декілька сотень Па. Катоди застосовуються сур`мяно-цезієві або срібно-киснево-цезієві.

Характеристика градування електровакуумного фотоелемента має вигляд

$$I_{\Phi} = f(\Phi_C) = S_{int} \cdot \Phi_C, \quad (8.22)$$

де I_{Φ} – фотострум, мА;

Φ_C – світловий потік, лм;

S_{int} – інтегральна чутливість фотокатода, мА/лм.

Фотоелектронні помножувачі є електровакуумними приладами, в яких електронний фотоелемент доповнений пристроєм для підсилення фотоструму за рахунок вторинної фотоелектронної емісії. Суть явища вторинної електронної емісії міститься у процесі виходу електронів з поверхні твердих або рідини при бомбардуванні їх поверхні первинними електронами. Тому то в такому перетворювачі, крім основного катоду K , є декілька вторинних катодів $K_1 \dots K_n$, які знаходяться під різними потенціалами, внаслідок чого, струм підсилюється у декілька сотень тисяч раз – рисунок 8.17.

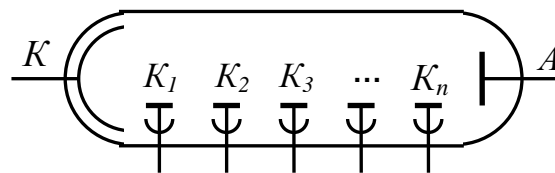


Рисунок 8.17 – Схема фотоелектричного помножувача

Фотоелектронні помножувачі мають малу інерційність і можуть працювати на досить високих частотах. Їх застосовують для реєстрації світлових імпульсів, що надходять через наносекундні проміжки часу, в астрономії, фототелеграфії і телебаченні, для вимірювання малих світлових потоків, для спектрального аналізу.

8.4 Методи та засоби вимірювання температури

Температуру вимірюють безконтактним і контактним методами.

Безконтактним методом температуру досліджуваного об'єкта визначають на основі вимірювань параметрів їх теплового випромінювання. Вимірювання здійснюються дистанційно (безконтактно), за допомогою вимірювальних приладів – *пірометрів*.

За *контактним методом* безпосередньо у середовище, температуру якого вимірюють, поміщають тепловий первинний вимірювальний перетворювач, вихідна величина якого є функцією температури.

У якості теплового первинного вимірювального перетворювача у контактних електричних термометрах використовують термоелектричні перетворювачі та термоопори (ТО).

Під'єднання термоопорів до вимірювального кола за допомогою з'єднувальних проводів з опором $R_{\text{Л}}$ може суттєво вплинути на точність вимірювання температури.

Опір з'єднувальних проводів треба підлаштовувати до значення, за якого градується показувальний прилад.

Існують дво-, три- та чотири провідні схеми під'єднання термоопорів до вимірювального приладу.

Вимірюючи температуру із застосуванням термоопорів, потрібно враховувати можливість появи додаткових похибок, які виникають від нагрівання їх вимірювальним струмом.

Щоб згадані похибки були незначними, значення вимірювального струму повинно бути таким, щоб зміна опору не перевищувала 0,1%.

Як вторинні прилади у комплекті з терморезистивними перетворювачами використовують мостові кола: зрівноважені та неврівноважені автоматичні мости, а також логометри та цифрові вимірювальні прилади.

На рисунку 8.18 наведена схема автоматичного моста для вимірювання температури. ТО вмикається в плече моста, яке прилягає до реохорда як наслідок, зміна опору реохорда буде пропорційна до зміни опору ТО, яка зумовлена зміною вимірюваної температури

$$\Delta R_p = \Delta R_T \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (8.23)$$

Для зменшення впливу опорів ліній у схемі використовують трипровідне ввімкнення ТО, опір окремих з'єднувальних проводів вмикається послідовно в сусідні плечі моста та діагональ живлення.

Неврівноважені мости застосовують у пристроях вимірювання температури рідше, ніж зрівноважені – рисунок 8.19.

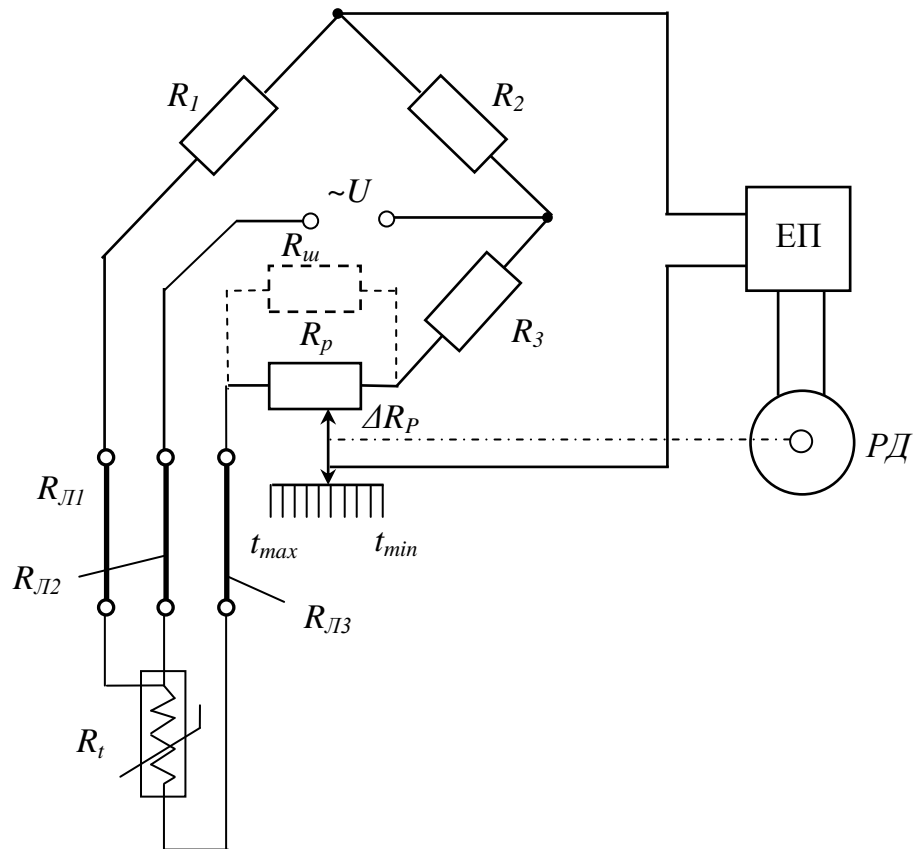


Рисунок 8.18 - Схема автоматичного моста для вимірювання температури

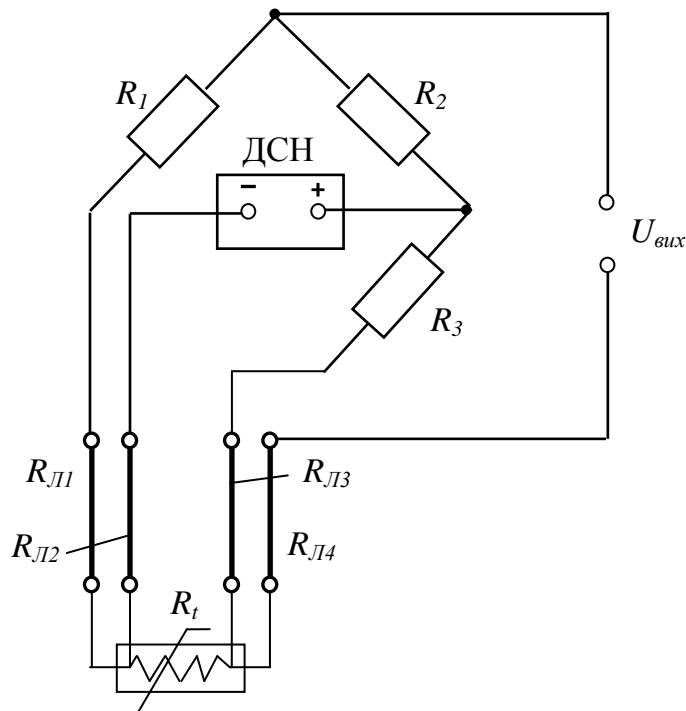


Рисунок 8.19 – Схема невірноваженого моста для вимірювання температури

До недоліків незрівноважених мостів належать не лінійність їх функцій перетворення, залежність вихідної напруги від напруги джерела живлення.

Проте через їх виняткову простоту за наявності стабілізованих джерел напруги незрівноважені мости використовують для вимірювання температур у вузькому температурному діапазоні, коли не лінійністю функцій перетворення незрівноваженого моста можна знехтувати або зробити прилад з нелінійною шкалою.

Сучасні автоматичні мости мають класи точності 0,25; 0,5; 1,0, які виражені у вигляді допустимої основної зведеної похибки, яка дорівнює

$$\gamma_{zp} = \pm \frac{\Delta R_{zp}}{R_{норм}} \cdot 100\% , \quad (8.24)$$

де ΔR_{zp} - граничне значення основної абсолютної похибки, Ом;

$R_{норм}$ - нормоване значення опору термоперетворювача, Ом.

$$R_{норм} = R_{\Theta_K} - R_{\Theta_H} , \quad (8.25)$$

де R_{Θ_K} – опір термоперетворювача опору, що відповідає кінцевій Θ_K температурі з діапазону вимірювань моста, Ом;

R_{Θ_H} – опір термоперетворювача опору, що відповідає початковій температурі Θ_H з діапазону вимірювань моста, Ом.

Метрологічні характеристики деяких автоматичних мостів, призначених для вимірювань температури у комплекті з терморезистивними перетворювачами опору, наведено в таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 - Метрологічні характеристики автоматичних мостів та цифрових приладів для вимірювання температури у комплекті з термоперетворювачами опору

Назва приладу	Тип приладу	Тип ПВП	Діапазон вимірювань, °C	Клас точності	Дискретність показів, °C
Автоматичний міст	КСМ2	ТОМ	0...100	0,5	-
	КСМ4	ТОП	0...500	0,25	-
Цифровий вимірювальний прилад	A566	ТОП	-50...1000	0,25/0,2	0,1
	ЦР7701-05	ТОМ	-200...200	0,1/0,05	0,1

Загальні особливості побудови *цифрових вимірювачів температури* пов'язані з низьким рівнем сигналів первинних вимірювальних перетворювачів, високим рівнем завад нормального та спільного видів, необхідністю лінеаризації загальної функції перетворення.

В цифрових термометрах з терморезистивними перетворювачами є аналогова та цифрова частини. Аналогова частина містить: перетворювач «напруга – струм» та перетворювач «струм – напруга»; суматор (СМ); масштабний резистор (R_{ON}); масштабний підсилювач (МП); перетворювач напруги на інтервал часу (ПНЧ); блок опорної напруги (E_O); блок керування аналоговою частиною (БКА). Аналогова частина екранована та гальванічно розділена з його цифровою частиною за допомогою блока гальванічного розділення (БГР). Цифрова частина складається з блока керування (БК), блока корекції адитивної похибки (БАП), блока цифрової лінеаризації (БЦЛ) та блока відображення інформації (БВІ).

Для усунення впливу з'єднувальних проводів терморезистивні перетворювачі можуть приєднуватись до ЦВТ як чотирипровідною лінією до струмових С1, С2 та потенціальних П1, П2 входів, так й за трьохпровідною лінією. При чотирипровідному під'єднанні вплив з'єднувальних проводів усувається повністю.

Розглянемо теоретичні положення щодо визначення похибок вимірювання температури терморезистивними термометрами. Похибка $\Delta\Theta_x$ вимірювання температури Θ_x за допомогою термоперетворювача опору та вторинного приладу (автоматичного моста або цифрового вимірювального приладу) має такі складові

$$\Delta\Theta_x = \Delta\Theta_{TO} + \Delta\Theta_{ВИ} , \quad (8.26)$$

де $\Delta\Theta_{TO}, \Delta\Theta_{ВИ}$ - відповідно похибки термоперетворювача опору та вторинного приладу, $^{\circ}C$.

Похибка $\Delta\Theta_{TO}$ має дві складові – інструментальну і методичну.

Граничне значення $\Delta\Theta_{ТО.зр}$ основної інструментальної похибки термоперетворювача опору, зумовлене відхиленням його дійсної статичної характеристики перетворення від номінальних статичних характеристик перетворення (НСХП), які наведені в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 - Границі допустимих відхилень характеристик перетворення термоперетворювачів опору від НСХП

Тип перетворювача	Клас допуску	Діапазон температур, °C	Границі допустимих відхилень від НСХП, $\pm \Delta\Theta_{ТО.зр}, ^\circ C$
Платиновий (ТОП)	А	-260...-250	3,0
		-250...-200	1,0
		-200...+750	$0,15 + 0,02 \cdot \Theta $
	В	-200...+1100	$0,4 + 0,005 \cdot \Theta $
	С	-100...+1100	$0,6 + 0,008 \cdot \Theta $
Мідний (ТОМ)	В	-200...+200	$0,25 + 0,0035 \cdot \Theta $
	С	-200...+200	$0,5 + 0,0065 \cdot \Theta $

Похибка $\Delta\Theta_{ВП}$ показу вторинного приладу складається з його основної та додаткових інструментальних похибок.

При використанні автоматичного моста граничне значення його основної похибки розраховується за формулою

$$\Delta\Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\Delta R_{зр}}{S_{ТО}}, \quad (8.27)$$

де $\Delta R_{зр}$ - допустиме значення основної абсолютної похибки моста, Ом;

$S_{ТО}$ - чутливість термоперетворювача опору, Ом/°C.

Допустима основна зведена похибка моста дорівнює

$$\gamma_{зр} = \pm \frac{\Delta R_{зр}}{R_{норм}} \cdot 100\% . \quad (8.28)$$

При використанні цифрового вторинного приладу граничне значення його основної похибки $\Delta\Theta_{ВП.зр}$ визначають за формулою

$$\Delta\Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\delta_{\Theta.зр} \cdot \Theta_X}{100}. \quad (8.29)$$

Приклад 8.1. Оцінити похибку вимірювання температури $\Theta_X = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ за допомогою цифрового вимірювального приладу типу ЦР7701-05 класу точності 0,1/0,05 з діапазоном вимірювання від мінус $50 \text{ }^\circ\text{C}$ до плюс $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, який працює в комплекті з платиновим термоперетворювачем опору класом допуску В.

Розв'язання 1. Граничне значення похибки термоперетворювача опору ТСП класу допуску В при температурі $700 \text{ }^\circ\text{C}$ визначаємо за формулою

$$\Delta\Theta_{ТО.зр} = \pm(0,4 + 0,005 \cdot |\Theta_X|) = \pm(0,4 + 0,005 \cdot 700) = \pm 3,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2. Граничне значення похибки $\Delta\Theta_{ВП.зр}$ цифрового приладу обчислюємо

$$\delta_{ВП.зр} = \pm \left[c + d \left(\frac{\Theta_K}{\Theta_X} - 1 \right) \right] = \left[0,1 + 0,05 \left(\frac{1000}{700} - 1 \right) \right] = \pm 0,17\% ;$$

$$\Delta\Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\delta_{\Theta.зр} \cdot \Theta_X}{100} = \frac{0,17 \cdot 700}{100} = \pm 1,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3. Результуюча похибка $\Delta\Theta_{X.зр}$ вимірювання температури $\Theta_X = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ розраховуємо $\Delta\Theta_{X.зр} = \pm(\Delta\Theta_{ТО.зр} + \Delta\Theta_{ВП.зр}) = \pm(3,9 + 1,2) = \pm 5,1 \text{ }^\circ\text{C}.$

Термоелектричні термометри використовуються для вимірювання температури у діапазоні від мінус 270 до плюс $2200 \text{ }^\circ\text{C}$. Робочий кінець перетворювача поміщають у середовище, температуру якого вимірюють, а вільні кінці під'єднують до вторинного приладу за допомогою спеціальних термоелектродних проводів, які виготовляють з того самого матеріалу, що й термоелектроди термоелектричного перетворювача.

Як вторинний прилад, у комплекті з термоелектричними перетворювачами використовують пірометричні мілівольтметри, автоматичні компенсатори та цифрові вимірювальні прилади.

Найпростіше вимірювальне коло термометра з термоелектричним перетворювачем - термопарою, зображено на рисунку 8.20.

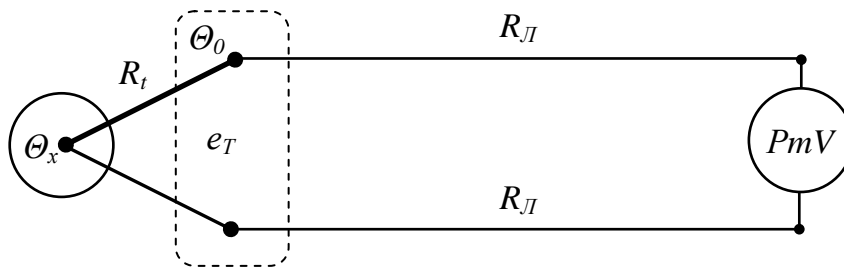


Рисунок 8.20 - Вимірювальне коло термометра з термоелектричним перетворювачем

Якщо температура вільних кінців термопари θ_0 й опір всього вимірювального кола будуть незмінними, покази мілівольтметрів визначатимуться значенням вимірюваної температури θ_x . Для того щоб зменшити залежність показів приладу від опору вимірювального кола, потрібно дотримуватись умови

$$R_{PmV} \gg R_T + 2R_{Л}. \quad (8.30)$$

При цьому похибка, яку вносить зовнішній опір вимірювального кола, буде дорівнювати

$$\delta = \frac{R_T + 2R_{Л}}{R_{PmV}} 100\%. \quad (8.31)$$

Потрібно також зазначити, що, так як функція перетворення термоелектричного перетворювача загалом нелінійна, то для переведення показів мілівольтметра у значення вимірюваної температури необхідно користуватись таблицями градування термоелектричного перетворювача.

Обов'язковою умовою, якої необхідно дотримуватись, працюючи з такими приладами, є забезпечення відповідності опору всього вимірювального кола приладу його значенню після градування.

Для налагоджування опору кола використовується шпуля $R_{ун}$ – рисунок 8.21.

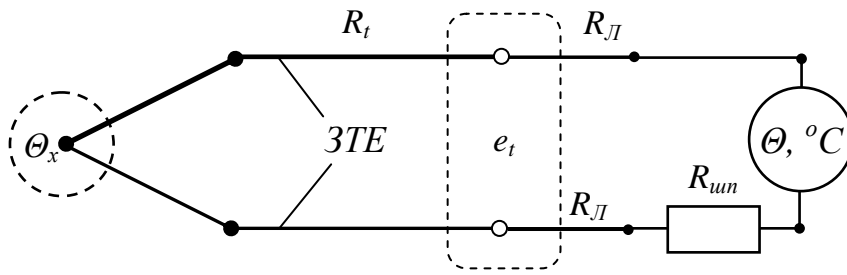


Рисунок 8.21 - Вимірювальне коло термометра з термоелектричним перетворювачем – термопарою зі шпулею

Одним з способів усунення похибки від зміни температури вільних кінців є їх термостатування. Оскільки термостатувати головку термоелектричного перетворювача, де закінчуються термоелектроди (їх вільні кінці), практично неможливо, то необхідно продовжити електроди перетворювача, не спотворюючи його термо-ЕРС, щоб відвести вільні кінці в таке місце, де їх зручно термостатувати.

Подовжувальні термоелектродні проводи ЗТЕ виготовляють не з тих самих дорогих металів, що й основні термоелектроди. Проте вони повинні бути термоелектрично ідентичними з відповідними електродами основної термопари, щоб запобігти виникненню паразитної термо-ЕРС.

У промислових умовах для введення коригування від зміни температури вільних кінців на покази приладу використовують пристрої автоматичного введення поправок. Таким пристроєм може бути мостове коло – рисунок 8.22, яке складається з температурозалежних манганінових опорів R_1 , R_2 , R_3 та опору R_4 з міді чи нікелю, опір яких змінюється залежно від температури.

Якщо температура термозалежного резистора, як і температура вільних кінців термопари, дорівнюватиме, наприклад, $0^\circ C$, то міст повинен перебувати у рівновазі. В разі відхилення цієї температури від $0^\circ C$ викликана цією зміною температури зміна термо-ЕРС термопари компенсуватиметься напругою небалансу моста, зумовленою зміною опору R_4 .

підсилювачем та надходить на реверсивний електродвигун. Ротор електродвигуна обертається та пересуває повзунк компенсатора доки різниця напруг не стане дорівнювати нулю. Електродвигун зупиняється, а по положенню повзунка компенсатора можна візуально визначити величину вимірювальної температури.

Сучасні автоматичні компенсатори мають класи точності 0,25; 0,5; 1,0, які виражені у формі допустимої основної зведеної похибки, яка дорівнює

$$\gamma_{ep} = \pm \frac{\Delta U_{ep}}{U_{norm}} \cdot 100\% , \quad (8.32)$$

де ΔU_{ep} - граничне значення основної абсолютної похибки, *мВ*;

U_{norm} - нормоване значення термо-ЕРС термоелектричного перетворювача *мВ*.

$$U_{norm} = |E_{\Theta_K} - E_{\Theta_{\Pi}}|, \quad (8.33)$$

де E_{Θ_K} – термо-ЕРС термоелектричного перетворювача, що відповідає кінцевій температурі Θ_K з діапазону вимірювань компенсатора, *мВ*;

$E_{\Theta_{\Pi}}$ – термо-ЕРС термоелектричного перетворювача, що відповідає початковій температурі Θ_{Π} з діапазону вимірювань компенсатора, *мВ*.

Метрологічні характеристики деяких автоматичних компенсаторів та цифрових приладів, призначених для вимірювань температури у комплекті з термоелектричними перетворювачами, наведено в таблиці 8.4.

Розглянемо теоретичні положення щодо визначення похибок вимірювання температури термоелектричними термометрами.

Таблиця 8.4 - Метрологічні характеристики автоматичних компенсаторів та цифрових приладів для вимірювання температури у комплекті з термоелектричним перетворювачами

Назва приладу	Тип приладу	Тип ПВП	Діапазон вимірювань, °C	Клас точності	Дискретність показів, °C
Автоматичний компенсатор	КСП-2	ТХА	0...900	0,5	-
	КСП-2	ТХК	0...600	0,5	-
	КСП-4	ТХА	0...1100	0,2	-
Цифровий вимірювальний прилад	A565	ТХА	0...1400	0,1/0,06	0,2
	A565	ТХК	50...800	0,15/0,05	0,1
	ЦР7701-01	ТХА	200...1400	0,1/0,05	0,1
	ЦР7701-01	ТХК	200...800	0,1/0,03	0,1

Похибка $\Delta\Theta_x$ вимірювання температури Θ_x за допомогою термоелектричного перетворювача та вторинного приладу (автоматичного компенсатора або цифрового вимірювального приладу) має такі складові

$$\Delta\Theta_x = \Delta\Theta_{ТП} + \Delta\Theta_{ТЕП} + \Delta\Theta_{ВП}, \quad (8.34)$$

де $\Delta\Theta_{ТП}, \Delta\Theta_{ТЕП}, \Delta\Theta_{ВП}$ - відповідно похибки термоелектричного перетворювача, термоелектричних проводів та вторинного приладу, °C.

Похибка $\Delta\Theta_{ТП}$ має дві складові – інструментальну, яка зумовлена відхиленням дійсної статичної характеристики перетворення термоелектричного перетворювача від номінального, і методичну, яка виникає через відхилення температури робочого кінця термоелектричного перетворювача Θ_p від вимірюваної температури Θ_x . Значення методичної похибки залежить від умов теплообміну між робочим кінцем термоелектричного перетворювача та середовищем, температуру якого вимірюють.

На практиці таку похибку намагаються звести до мінімуму, застосовуючи відповідну конструкцію термоелектричного перетворювача і встановлюючи його на об'єкті так, щоб забезпечити максимальне вирівнювання температур Θ_p та Θ_x . Граничне значення $\Delta\Theta_{ТП.зр}$ основної інструментальної похибки термоелектричного перетворювача розраховується за формулами, які наведені в таблиці 8.5.

Таблиця 8.5 - Границі допустимих відхилень характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів від НСХП

Тип перетворювача	Клас допуску	Діапазон температур, $^{\circ}C$	Границі допустимих відхилень від НСХП, $\pm \Delta\Theta_{ТП.зр}, ^{\circ}C$
ТХА	3	мінус 250...плюс 166,7	$0,015 \cdot \Theta $
		мінус 166,7... плюс 40	2,5
	2	мінус 40...плюс 333,4	2,5
		плюс 333,4... плюс 1350	$0,0075 \cdot \Theta$
	1	мінус 40... плюс 375	1,5
плюс 375... плюс 1350		0,004	
ТХК	3	мінус 200...плюс 100	$1,5 + 0,01 \cdot \Theta $
		мінус 100...плюс 100	2,5
	2	мінус 40...плюс 400	2,5
		плюс 400... плюс 800	$0,7 + 0,005 \cdot \Theta$

Похибка $\Delta\Theta_{ТЕП.зр}$ зумовлена відхиленням термо-ЕРС термоелектричних проводів від номінального значення і її граничне значення можна знайти за формулою

$$\Delta\Theta_{ТЕП.зр} = \pm \frac{\Delta E_{ТП.зр}}{S_{ТЕЕ}}, \quad (8.35)$$

де $\Delta E_{ТЕП.зр}$ - границя допустимого відхилення термо-ЕРС термоелектричних проводів від номінального значення статичної характеристики, mB ;

$S_{ТЕЕ}$ - чутливість термоелектричних проводів термоелектричних проводів, $mB/^{\circ}C$.

Похибка $\Delta\Theta_{ВП}$ показу вторинного приладу складається з його основної та додаткових інструментальних похибок. При використанні автоматичного компенсатора граничне значення його основної похибки розраховується за формулою

$$\Delta\Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\Delta U_{зр}}{S_{ТП}}, \quad (8.36)$$

де $\Delta U_{зр}$ - допустиме значення основної абсолютної похибки компенсатора, мВ.

$S_{ТП}$ - чутливість термоелектричного перетворювача, мВ/°С.

Таблиця 8.6 - Технічні характеристики стандартних термоелектричних проводів (ТЕП)

Тип ПВП	Додатковий термоелектрод		Від'ємний термоелектрод		Позначення проводу	Значення термо-ЕРС, мВ, при $\Theta_P = 100^\circ\text{C}$ $\Theta_{\text{в.л.к.н.ц.}} = 0^\circ\text{C}$	Границя допустимого відхилення, $\Delta E_{ТЕП.зр}$, мВ
	матеріал	колір	матеріал	колір			
ТХА	мідь	червоний, рожевий	константант	коричневий	МК	4,10	±0,15
ТХК	хромель	фіолетовий, чорний	копель	жовтий, оранжевий	ХК	6,95	±0,20

Допустима основна зведена похибка автоматичних компенсаторів визначається за формулою

$$\gamma_{зр} = \pm \frac{\Delta U_{зр}}{U_{норм}} \cdot 100\%. \quad (8.37)$$

Чутливість термоелектричного перетворювача визначається за формулою

$$S_{ТП} = \frac{\Delta E_{ТП}}{\Delta \Theta}, \quad (8.38)$$

де $\Delta \Theta = \Theta_2 - \Theta_1$ - приріст температури відносно точки $\Theta_X, ^\circ C$;

$\Delta E_{ТП} = E_{\Theta_2} - E_{\Theta_1}$ - відповідний приріст термо-ЕРС термоелектричного перетворювача, мВ.

В таблиці 8.7 наведені нормальні статичні характеристики перетворення (НСХП) термоелектричних перетворювачів.

Таблиця 8.7 - Нормальні статичні характеристики перетворення (НСХП) термоелектричних перетворювачів

Температура робочого кінця, $\Theta_P, ^\circ C$		-200	-50	0	20	200	400	500
термо-ЕРС, E_{Θ_P} , при $\Theta_{\text{вкл.кінц.}} = 0 ^\circ C$	ТХА	-5,891	-1,889	0	0,798	8,137	16,395	20,640
	ТХК	-9,488	-3,004	0	1,289	14,557	31,488	40,292
Температура робочого кінця, $\Theta_P, ^\circ C$		600	700	800	1000	1100	1200	1400
термо-ЕРС, E_{Θ_P} , при $\Theta_{\text{вкл.кінц.}} = 0 ^\circ C$	ТХА	24,902	29,128	33,3	41,269	45,108	48,828	52,398
	ТХК	49,098	57,857	66,5	-	-	-	-

При використанні цифрового вторинного приладу граничне значення його основної похибки $\Delta \Theta_{\text{ВП.зр}}$ визначають за формулою

$$\Delta \Theta_{\text{ВП.зр}} = \pm \frac{\delta_{\Theta.зр} \cdot \Theta_X}{100}. \quad (8.39)$$

Приклад 8.2 Оцінити похибку вимірювання температури $\Theta_X = 500 ^\circ C$ за допомогою автоматичного компенсатора КСП2 класу точності 0,5 з діапазоном вимірювання від $0 ^\circ C$ до плюс $800 ^\circ C$, який працює в комплекті з термоелектричним перетворювачем типу ТХА класом допуску 2.

Розв'язання 1. Граничне значення похибки термоелектричного перетворювача типу ТХА класу допуску 2 при температурі $500 ^\circ C$ визначаємо за формулою

$$\Delta \Theta_{\text{ТП.зр}} = \pm 0,0075 \cdot \Theta_X = \pm 0,0075 \cdot 500 = \pm 3,75 ^\circ C.$$

2. Граничне значення похибки $\Delta\Theta_{ТЕП.зр}$ термоелектричних проводів перетворювача типу ТХА визначаємо за формулою $\Delta\Theta_{ТЕП.зр} = \pm \frac{\Delta E_{ТП.зр}}{S_{ТЕЕ}}$,

при цьому,

$$S_{ТЕЕ} = \frac{E_{ТЕП}}{\Theta_p - \Theta_{вил.кінц}} = \frac{4,10}{100 - 0} = 0,041 \text{ мВ}/^{\circ}\text{С};$$

$$\Delta\Theta_{ТЕП.зр} = \pm \frac{\Delta E_{ТП.зр}}{S_{ТЕЕ}} = \pm \frac{0,15}{0,041} = \pm 3,66^{\circ}\text{С}.$$

3. Допустиме значення основної абсолютної похибки компенсатора дорівнює

$$\Delta U_{зр} = \pm \frac{\gamma_{зр} \cdot U_{норм}}{100} = \pm \frac{0,5 \cdot 33,277}{100} = \pm 0,166 \text{ мВ};$$

$$\text{де } U_{норм} = |E_{\Theta_K} - E_{\Theta_{П}}| = |E_{800} - E_0| = |33,277 - 0| = 33,277 \text{ мВ};$$

4. Чутливість термоелектричного перетворювача визначаємо

$$S_{ТП} = \left(\frac{\Delta E_{ТП}}{\Delta\Theta} \right) = \frac{E_{600} - E_{400}}{600 - 400} = \frac{29,902 - 16,395}{200} = 0,0425 \text{ мВ}/^{\circ}\text{С}.$$

5. Граничне значення похибки $\Delta\Theta_{ВП.зр}$ автоматичного компенсатора буде дорівнювати $\Delta\Theta_{ВП.зр} = \pm \frac{\Delta U_{зр}}{S_{ТП}} = \frac{0,166}{0,0425} = \pm 3,9^{\circ}\text{С}$.

6. Результуюча похибка $\Delta\Theta_{Х.зр}$ вимірювання температури $\Theta_X = 500^{\circ}\text{С}$

$$\Delta\Theta_{Х.зр} = \pm(\Delta\Theta_{ТП.зр} + \Delta\Theta_{ТЕП.зр} + \Delta\Theta_{ВП.зр}) = \pm(3,75 + 3,66 + 3,9) = \pm 11^{\circ}\text{С}.$$

8.5 Методи та засоби вимірювання механічних величин

Із механічних величин, які вимірюють найчастіше, основними є механічні зусилля. Їх поділяють на: механічні сили, які спрямовані лінійно, та крутні моменти, які є обертовими, а також на розподілені зовнішні зусилля – тиск, та внутрішні розподілені зусилля, що виникають в тілі об'єкту, що досліджується - механічні напруження.

Принцип вимірювань механічних величин оснований на відомих в механіці залежностях деформацій та напруг в матеріалі від сил та тиску. Ці залеж-

ності дозволяють встановити вид перетворювання механічної величини, обрати тип перетворювача та вимірювального кола.

Вимірювання сили F , відносної деформації $\varepsilon_l = \Delta l / l$, модуля пружності E і механічних напружень σ , що виникають у тілі площею S при дії на нього сили F , є однією і тією самою задачею, так як справедливе таке відношення

$$\sigma = \varepsilon_l \cdot E = \frac{F}{S}. \quad (8.40)$$

Вимірювання механічних напружень. Найпоширенішим способом визначення механічних напружень є вимірювання деформації поверхні об'єкту, що досліджується. Діапазон вимірюваних деформацій дуже широкий, а саме, від часток мікрметра в металах та в твердих пластмасах до десятків сантиметрів у зразках з еластичних матеріалів.

Найпростішим методом вимірювань деформацій є тензометричний метод, первинним перетворювачами деформації в якому є тензорезистори, які наклеюються на досліджувану деталь спеціальними клеями. Особливістю тензорезисторів, що наклеєні на об'єкт, є те, що їх не можна переклеїти з об'єкта та інший об'єкт.

У схемі, яка наведена на рисунку 8.24, тензорезистор R_4 працює на розтягнення і опір його збільшується, тензорезистор R_3 працює на стиснення, як наслідок, опір його зменшується.

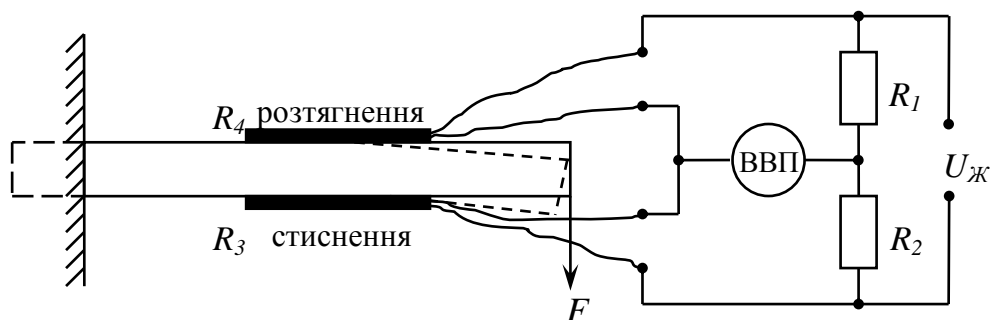


Рисунок 8.24 – Схема вимірювання механічних напружень

Вихідна напруга вимірювального моста дорівнює

$$U_{ВИХ} = U_{Ж} \cdot \frac{(1 + \varepsilon_{R4}) \cdot R_4 \cdot R_2 - (1 - \varepsilon_{R3}) \cdot R_3 \cdot R_1}{[(1 + \varepsilon_{R4}) \cdot R_4 + (1 - \varepsilon_{R3}) \cdot R_3] \cdot (R_2 + R_1)}, \quad (8.41)$$

де $U_{Ж}$ - напруга живлення;

ε_{R3} , ε_{R4} – відносні зміни опорів тензорезисторів R_3 та R_4 , спричинені деформацією деталі, на яку наклеєні ці тензорезистори;

R_1 та R_2 – опори ненавантажених тензорезисторів.

Вихідну напругу вимірювального моста вимірюють вторинним приладом ВП, а саме, цифровим мілівольтметром з високим вхідним опором. Так як відносна зміна опору тензорезистора ε_R пов'язана з відносною деформацією ε_l деталі, на яку наклеєний тензорезистор, коефіцієнтом тензочутливості k , тобто $\varepsilon_R = k\varepsilon_l$, тоді вимірювані величини визначаються за виразами

- відносна деформація

$$\varepsilon_l = \frac{2}{kU_{Ж}} \cdot U_{ВИХ}. \quad (8.42)$$

- механічне напруження

$$\sigma = \frac{2 \cdot E}{kU_{Ж}} \cdot U_{ВИХ}. \quad (8.43)$$

Вимірювання механічних сил. Переважна більшість силовимірювальних пристроїв - *динамометрів* основана на методі перетворення вимірюваної сили на механічні напруження у матеріалі пружного перетворювального елемента і його деформацію, які за допомогою тензорезистивних, індуктивних та п'єзоелектричних, магнітопружних перетворювачів, перетворюються на електричний сигнал або зміну вихідного електричного параметра.

Залежно від значення вимірюваної сили, як первинні перетворювачі використовують стрижневі елементи, пружні кільця або консольні пружні елементи. Вторинними перетворювачами динамометрів з механічними пружними перетворювачами сили на деформацію є переважно тензорезистивні перетворювачі, а вторинними вимірювальними кола є мостові вимірювальні кола. Похибка вимірювань такими динамометрами складає 1...2%. Отже, для вимірювання сили F_x придатна схема (див. рисунок 8.24), з одним робочим та одним компенсуючим тензорезисторами.

На практиці застосовують складніші схеми тензометричних мостів, в яких, крім основних (робочих) тензорезисторів, увімкнені також й регульовальний резистор для встановлення початкового значення діапазону вимірювань, термозалежний резистор для компенсації зміни чутливості схеми від зміни температури довкілля, резистор для регулювання і встановлення номінальної чутливості. Термозалежний резистор повинен мати достатній тепловий контакт з об'єктом дослідження, на якому наклеєні робочі тензорезистори. Для цього застосовують електроізоляційний клей з високою теплопровідністю. Значення механічних кіл за результатами вимірювань деформацій розраховують зі співвідношення між вимірюваною силою F_x та деформацією ε_l для відповідних перетворювачів:

- для пружного перетворювача у вигляді стрижня сталого перерізу

$$F_x = S \cdot E \cdot \varepsilon_l, \quad (8.44)$$

де S – площа поперечного перерізу стрижня;

E – модуль пружності матеріалу стрижня;

- для консольної балки рівномірного перерізу

$$F_x = \frac{E \cdot h^2 \cdot b}{6 \cdot (l - x)} \cdot \varepsilon_l, \quad (8.45)$$

де b, h, l – геометричні розміри балки;

x – відстань від місця закріплення балки до середини тензорезистора.

Незважаючи на порівняно низьку точність (2...3 %), широко застосовують для вимірювань великих сил ($10^5 \dots 10^6$ Н) динамометри з магнітопружними перетворювачами, які відрізняються простотою конструкції, високою надійністю, значною потужністю вхідного сигналу. Один з перетворювачів є робочим, а другий ідентичний йому перетворювач призначений для компенсації початкової індуктивності робочого перетворювача, а також для компенсації впливу зовнішніх чинників, зокрема температури довкілля, частоти джерела живлення.

Основою п'єзоелектричних динамометрів є п'єзоелектричні перетворювачі сили на електричний заряд. При введенні у п'єзодинамометри підсилювачів заряду у тисячі разів зменшилось стикання заряду та стала можливою довготривала підтримка значення вихідного сигналу, що дало можливість створити сучасні п'єзодинамометри і для вимірювання сталих сил. До переваг п'єзодинамометрів належить їх висока чутливість, висока швидкодія, а зведена похибка знаходиться у межах 1 %.

Кутові швидкості обертальних частин машин та механізмів вимірюють *тахометрами*. Застосовуються два основні види тахометрів: на визначенні частоти обертання об'єкта дослідження та на порівнянні частоти об'єкта зі стабільною частотою незалежного джерела.

Прилади для вимірювання *крутних моментів* мають назву *торсіометри*, принцип дії яких оснований на вимірюванні дотичних напруг, які виникають в матеріалі вала та які зв'язані з крутним моментом співвідношенням

$$M = \tau \cdot W_p, \quad (8.46)$$

де W_p – полярний момент опору круглого валу радіусом r ;

τ – дотична напруга.

На рисунку 8.25 наведений фрагмент наклеювання тензорезисторів на вал зі струмознімачем торсіометра.

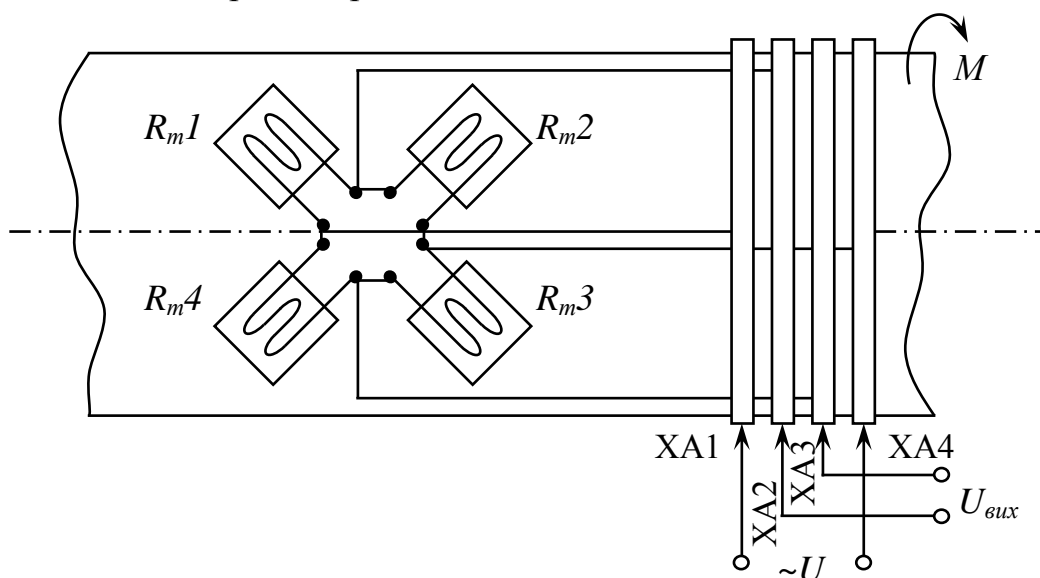


Рисунок 8.25 – Фрагмент наклеювання тензорезисторів на вал зі струмознімачем торсіометра

Тензорезистори наклеюються до напрямку найбільших дотичних напруг, тобто під кутом 45^0 до осі вала. Включення тензорезисторів до двох сусідніх плечей вимірювального моста забезпечує не тільки температурну компенсацію, а й усувається вплив вигину вала на результат вимірювання, так як значення та знаки деформацій обох перетворювачів однакові. Струмознімач є найбільш важливою частиною торсіометра, який з'єднує тензорезистори з електричним вимірювальним колом. За конструкцією струмознімач - це контактне кільце на валу та контактні щітки. Для зменшення впливу паразитних контактних термо-ЕРС вимірювальні схеми живляться змінним струмом.

Основним параметром руху рідин та газів є витрата речовини, яка протікає через повний перетин його потоку за одиницю часу. Діапазон витрат знаходиться у межах від 10^{-3} до декількох тисяч кубометрів за годину.

Прилади для вимірювання витрати мають назву *витратоміри*, а для вимірювання кількості речовини – *лічильники кількості*. Методи вимірювань дуже різноманітні, а кількість різновидів витратомірів та лічильників велика. Найпоширенішими є витратоміри змінного перепаду тисків із звужувальними пристроями, сталого перепаду тиску з перетвореннями витрати на силу та переміщення (ротаметри), тахометричні, теплові та індукційні витратоміри.

Для вимірювання швидкості та об'ємної витрати електропровідних рідин в трубопроводах застосовують індукційні (електромагнітні) витратоміри. Принцип дії таких витратомірів оснований на законі електромагнітної індукції згідно якого ЕРС, яка виникає в провіднику, прямо пропорційна швидкості його руху в магнітному полі. Під дією змінного магнітного потоку, який створюється електромагнітом, в потоці рідини виникає ЕРС, значення якої пропорційне швидкості руху рідини та її об'ємній витраті.

На рисунку 8.26 наведена схема індукційного (електромагнітного) витратоміра, який складається:

- з труби з ізоляційного матеріалу (1);
- з електромагніту (2);
- з магнітної системи (3);

- з обмотки електромагніту (4);
- з двох електродів (5);
- з додаткової компенсаційної обмотки (6);
- з резистора регулювання (7);
- з підсилювача (8);
- з вторинного вимірювального приладу (9).

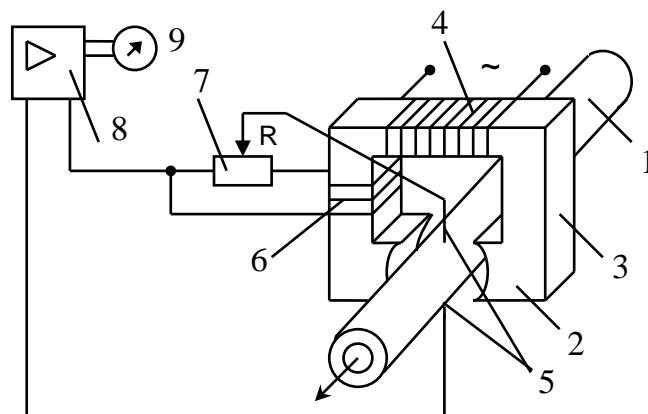


Рисунок 8.26 – Схема індукційного (електромагнітного) витратоміра

8.6 Методи та засоби вимірювання рівня рідин

Вимірювання рівня – це визначення відстані між двома паралельними площинами, одна з яких є лінією відліку, друга – площиною, яка розділяє два середовища різної густини.

Рівнемір – перетворювач для безперервного вимірювання рівня в будь – якій точці ємності. *Сигналізатор рівня* – перетворювач для контролю рівня в окремих точках ємності.

Розглянемо прилади для вимірювання рівня рідини більш детально.

На рисунку 8.27 наведено схему електромеханічного поплавкового рівнеміра з реостатним перетворювачем переміщення та логотричним вимірювальним приладом для вимірювання рівня пального в закритих баках.

вжина якого набагато більша від його діаметра – рисунок 8.28, а питома густина значно більша від питомої густини досліджуваної рідини.

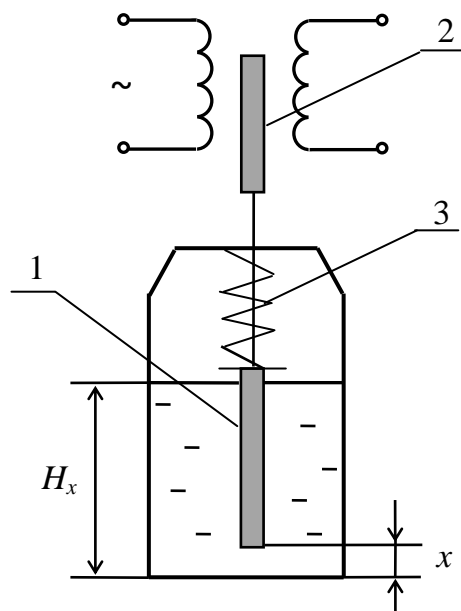


Рисунок 8.28 – Схема буйкового (плунжерного) рівнеміра

Такий буйок механічно з'єднаний з чутливим елементом 2 вторинного перетворювача, а його переміщення обмежується за допомогою пружини 3, закріпленої одним кінцем до верхньої частини буйка, а іншим - до нерухомої частини перетворювача. Залежно від рівня рідини на буйок діятиме підйомна сила, внаслідок чого пружина стискається, чутливим елементом є плунжер індуктивного та взаємодуктивного перетворювача, який переміщується, змінюючи відповідно вихідну індуктивність, і як наслідок, повний електричний опір.

Характеристику градування буйкового перетворювача можна визначити, враховуючи, що під час занурення буйка в рідину на нього діє виштовхувальна сила

$$F_x = S \cdot (H - x) \cdot \rho_p \cdot g, \quad (8.48)$$

де H – рівень рідини;

x – переміщення буйка;

S – площа поперечного перерізу буйка;

ρ_p - питома густина рідини.

Сила пружності пружини змінюється на величину $F_{np} = W \cdot x$. Переміщення буйка в кінцевому результаті буде дорівнювати

$$x = H \cdot \frac{1}{1 + \frac{W}{\rho_p \cdot g \cdot S}}. \quad (8.49)$$

Вторинними вимірювальними приладами таких рівнемірів є прилади з астатичним зрівноважувальним перетворенням та вторинним диференціально-трансформаторним перетворювачем.

На рисунку 8.29 наведена схема буйкового рівнеміра зрівноважувального перетворення. Вихідною величиною таких приладів є струм. Такі рівнеміри призначені для вимірювання рівня рідин у технічних місткостях з рівнем заповнення до 10...16 м. Їх зведена похибка знаходиться у межах до 1,5 %.

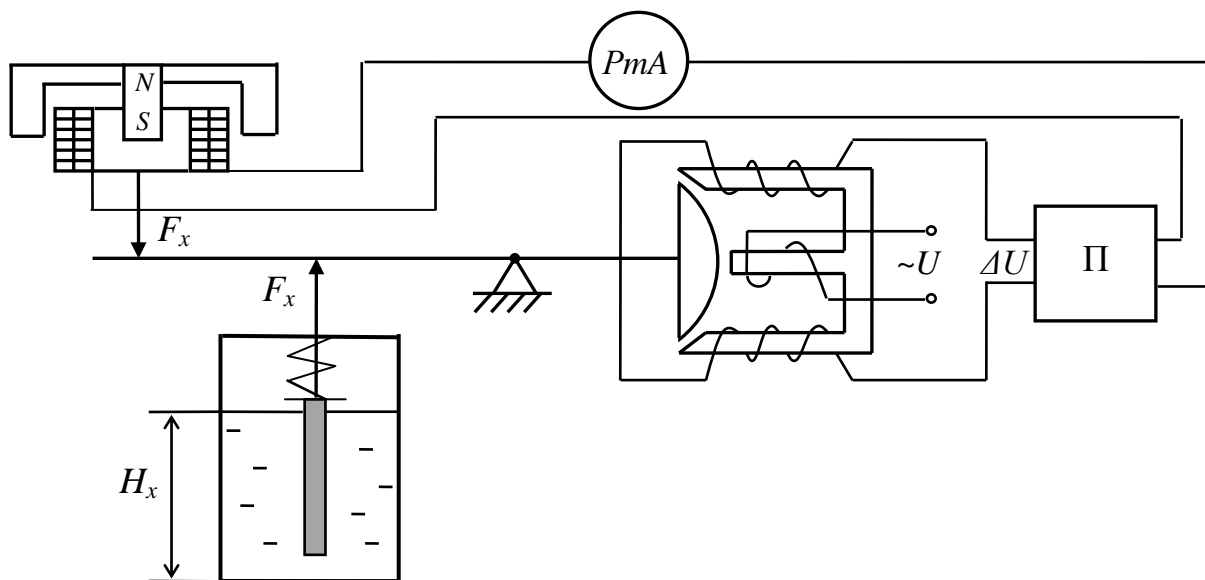


Рисунок 8.29 - Схема буйкового рівнеміра зрівноважувального перетворення

Розглянемо принцип дії рівнеміра більш детально. На буйок, занурений у досліджувану рідину, діятиме виштовхувальна сила F_x , що приводить до його переміщення. Це переміщення за допомогою коромисла перетворюється на поворот осердя диференціально-трансформаторного перетворювача. Нерухома частина магнітопроводу виконана у вигляді Ш-подібного осердя. На середньому його стрижні намотана первинна намагнічувальна обмотка, що живиться від

джерела змінної напруги. Дві ідентичні вимірювальні обмотки, намотані на крайні стрижні, утворюють два ідентичні перетворювальні елементи. Обмотки з'єднані послідовно і зустрічно.

Диференціально-трансформаторний перетворювач рівня, який побудований так, що за нульового значення вимірюваного рівня чи деякого його номінального значення рухоме осердя займає симетричне щодо обох перетворювальних елементів положення, а наведені в них ЕРС будуть однаковими, при цьому їх різниця дорівнюватиме нулю. Зі зміною вимірюваного рівня і відповідним переміщенням рухомого осердя змінюються потоки в окремих перетворювальних елементах і наведені в них ЕРС. З'являється деяка різниця ЕРС, яка подається на підсилювач, вихідна напруга якого після перетворення змінного струму на постійний подається до вимірювальної обмотки зворотного магнітоелектричного перетворювача.

Струм I_x , що проходить через вимірювальну обмотку, взаємодіючи з полем постійного магніту, створює компенсувальну силу F_k , спрямовану назустріч силі F_x . Струм, що протікатиме в момент рівноваги цих сил, буде мірою вимірюваного рівня. Значення цього струму вимірюється міліамперметром, а для точніших вимірювань струму використовують компенсатори постійного струму, що вимірюють спад напруги на вимірювальній котушці опору, який увімкнений замість міліамперметра.

Ємнісні рівнеміри відрізняються універсальністю, високою чутливістю, простотою вимірювального кола, відсутністю рухомих елементів у зоні вимірюваного рівня. Однією з основних проблем під час побудови ємнісних рівнемірів є компенсація змін відносних діелектричних проникностей середовища, рівень якого вимірюють, та наявність повітря між електродами вимірювального перетворювача в зоні, що не заповнена середовищем.

На рисунку 8.30 наведено схему ємнісного рівнеміра, в якій вплив зміни проникностей усунуто за допомогою компенсаційних конденсаторів.

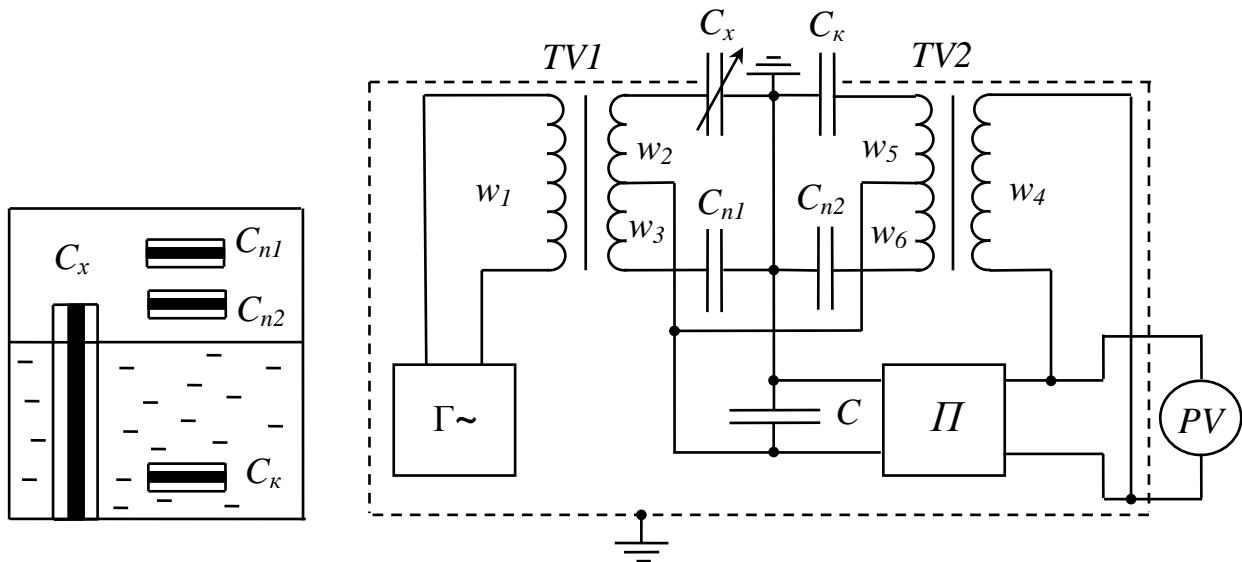


Рисунок 8.30 - Схема ємнісного рівнеміра

Рівнемір має робочий конденсатор C_x та три компенсувальні конденсатори, два з яких C_{n1} та C_{n2} знаходяться у повітрі та один C_K повністю занурений в досліджуване середовище. Вимірювальне коло такого рівнеміра складається з генератора змінної напруги Γ , підсилювача Π , вольтметра PV та двох трансформаторів $TV1$ та $TV2$. Пристрій працює в режимі статичного зрівноважувального перетворення.

Покази вольтметра U_{PV} будуть пропорційні до зміни вимірюваного рівня H_x і не залежатимуть від значення діелектричної проникності середовища ϵ_x , так як

$$U_{PV} = \frac{H_x}{l_k} \cdot \frac{w_2 \cdot w_4}{w_1 \cdot w_5} \cdot U = k \cdot H_x \cdot U, \quad (8.50)$$

де l_k – довжина компенсаційного конденсатора, який повністю занурений в середовище;

U – напруга на виході генератора;

H_x – вимірюваний рівень.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 8

1 Які основні особливості вимірювань неелектричних величин електричними засобами вимірювань?

- 2 Які принципові відмінності між генераторними та параметричними перетворювачами?
- 3 Які Вам відомі різновиди вимірювальних перетворювачів залежно від їх функції перетворення?
- 4 Як класифікують вимірювальні перетворювачі залежно від фізичних закономірностей, які покладені в основу їх принципу дії?
- 5 Назвіть основні різновиди пружних перетворювачів механічних зусиль.
- 6 Поясніть принцип дії генераторних первинних перетворювачів та наведіть рівняння перетворення.
- 7 Поясніть принцип дії параметричних первинних перетворювачів переміщень. Оцініть характер функції перетворення.
- 8 Поясніть принцип дії та наведіть рівняння перетворення термоелектричного перетворювача температури.
- 9 Опишіть принцип дії узагальненої структурної схеми приладу для вимірювання неелектричних величин.
- 10 Назвіть методи та охарактеризуйте засоби вимірювання механічних величин та рівня.
- 11 Назвіть методи та охарактеризуйте засоби вимірювання температури.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 8

- 1 Оцінити похибку вимірювання температури Θ_x за допомогою термоелектричного перетворювача (термопари) та вторинного приладу відповідно до варіанта – див. таблицю 1 до завдання.

Таблицю 1

№ варіанта	$\Theta_x, ^\circ C$	Термопара	Вторинний прилад		
		тип	Тип	Клас точності	Діапазон вимірювань, $^\circ C$
1	400	ТХА	КСП2	0,5	0...600
2	200	ТХК	КСП2	0,5	0...600
3	800	ТХА	A565	0,1/0,06	0...1400
4	600	ТХК	ЦР7701-01	0,1/0,05	-200...800
5	900	ТХА	ЦР7701-01	0,1/0,05	-200...1400

2 Оцінити похибку вимірювання температури Θ_x за допомогою терморезистора та вторинного приладу відповідно до варіанта – див. таблицю 2 до завдання.

Таблиця 2

№ варіанта	$\Theta_x, ^\circ C$	Терморезистор	Вторинний прилад		
		тип	Тип	Клас точності	Діапазон вимірювань, $^\circ C$
1	50	ОТМ	КСМ2	0,5	0...100
2	200	ТОП	КСМ4	0,25	0...500
3	900	ТОП	A566	0,25/0,2	-50...1000
4	100	ТОМ	ЦР7701-05	0,1/0,05	-200...200

3 Індуктивна котушка індуктивного рівнеміра має такі параметри: кількість витків $w = 500$, довжина середньої лінії магнітопровід $l = 20 \text{ см}$, площа перерізу магнітопроводу $s = 3 \text{ см}^2$, магнітна проникність $\mu = 1$.

Визначити силу струму та індуктивність котушки перетворювача, при якій магнітний потік дорівнює $45 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$.

4 Задана функціональна математична залежність, яка характеризує зміну опору тензорезистивного перетворювача у функції відносної деформації об'єкту: $R = R_0 \cdot (1 + S_T \cdot \epsilon)$, де R - опір тензорезистора після зняття деформації; R_0 - опір тензорезистора в початковому стані (без деформації); S_T - тензочутливість тензорезистора; ϵ - відносна деформація.

Опишіть, у загальному графічному вигляді, характеристику градуювання тензорезистора та його коефіцієнт перетворення.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 8

1. Засіб вимірювання, який призначений для вироблення сигналу електричної інформації, у формі, яка зручна для передачі, обробки, подальшого перетворення та зберігання, але цей сигнал не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем, має назву ...

- 1 вторинний вимірювальний прилад
- 2 генераторний первинний вимірювальний перетворювач
- 3 параметричний первинний вимірювальний перетворювач
- 4 первинний вимірювальний перетворювач

2. Вимірювальний прилад, який оброблює, перетворює електричну інформацію, яка надходить з первинного вимірювального перетворювача, а також надає візуальну інформацію щодо неелектричної вимірюваної величини, має назву ...

- 1 вторинний вимірювальний прилад
- 2 генераторний первинний вимірювальний перетворювач
- 3 параметричний первинний вимірювальний перетворювач
- 4 цифровий вимірювальний прилад

3. Оберіть дві вірні відповіді.

Як поділяються первинні вимірювальні перетворювачі за принципом дії?

- 1 генераторні
- 2 параметричні
- 3 п'єзоелектричні
- 4 теплові

4. Що таке генераторний первинний вимірювальний перетворювач?

1 це первинний перетворювач, у якому вимірювальна неелектрична величина перетворюється у різні параметри електричних кіл – опір, ємність, індуктивність та частоту

2 це первинний перетворювач, у якому вимірювальна неелектрична величина перетворюється у пропорційну ЕРС або силу струму

3 засіб вимірювання, який призначений для вироблення сигналу електричної інформації, у формі, яка зручна для передачі, обробки, подальшого перетворення та зберігання, але цей сигнал не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем

4 вимірювальний прилад, який оброблює, перетворює електричну інформацію, яка надходить з первинного вимірювального перетворювача, а також надає візуальну інформацію щодо неелектричної вимірюваної величини

5. Первинний перетворювач, у якому вимірювальна неелектрична величина перетворюється у різні параметри електричних кіл – опір, ємність, індуктивність та частоту, має назву ...

- 1 генераторний первинний вимірювальний перетворювач
- 2 параметричний первинний вимірювальний перетворювач
- 3 тепловий генераторний вимірювальний перетворювач
- 4 оптичний первинний вимірювальний перетворювач

6. Перетворювачі, принцип дії яких оснований на використанні теплових процесів – нагрівання, охолодження, теплообміну, і входною величиною таких перетворювачів є неелектрична величина – температура, мають назву ...

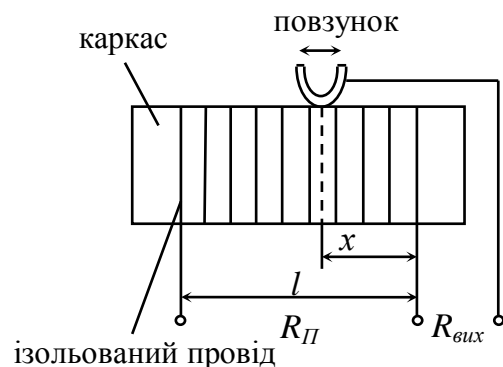
- 1 оптичні первинні вимірювальні перетворювачі
- 2 тензорезистивні первинні перетворювачі
- 3 теплові первинні вимірювальні перетворювачі
- 4 п'єзоелектричні первинні перетворювачі

7. Принцип дії яких первинних вимірювальних перетворювачів ґрунтується на використанні термоелектричного ефекту Зеєбека?

- 1 термоелектричних перетворювачів - термопар
- 2 тензорезистивних перетворювачів
- 3 п'єзоелектричних перетворювачів
- 4 ємнісних перетворювачів

8. Схема якого первинного вимірювального перетворювача наведена на рисунку?

- 1 схема терморезистора
- 2 схема ємнісного перетворювача
- 3 схема фольгового тензорезистора
- 4 схема реостатного перетворювача



9. Принцип дії яких первинних вимірювальних перетворювачів ґрунтується на явищі тензоефекту?

- 1 електромагнітних первинних перетворювачів
- 2 тензорезистивних первинних перетворювачів

- 3 п'єзоелектричних первинних перетворювачів
- 4 ємнісних первинних перетворювачів

10. Доповніть відповідь.

... - це фотоелектричні параметричні перетворювачі, принцип дії яких оснований на явищі внутрішнього фотоелефекту.

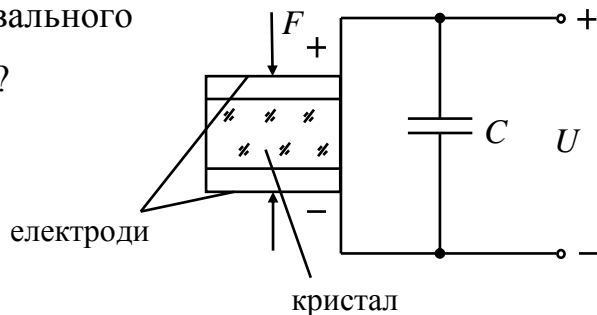
- 1 фотоелементи
- 2 фотопомножувачи
- 3 фоторезистори
- 4 фотодіоди

11. Яка аналітична залежність є характеристикою градування ємнісного первинного перетворювача?

- 1 $E_T = \alpha_T \cdot (T_1 - T_2)$
- 2 $U = f(F) = \frac{d_{11}}{C} \cdot F$
- 3 $C = f(\delta) = \epsilon_0 \epsilon \cdot S \cdot \frac{1}{\delta}$
- 4 $e = f(\alpha) = -BW \cdot S \frac{d\alpha}{dt}$

12. Схема якого первинного вимірювального перетворювача наведена на рисунку?

- 1 ємнісного
- 2 індукційного
- 3 п'єзоелектричного
- 4 індуктивного

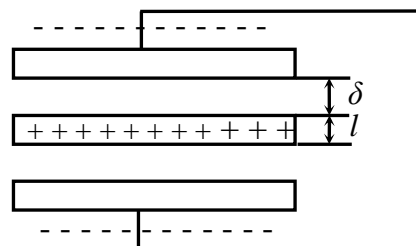


13. Які первинні вимірювальні перетворювачі є чутливими елементами в електропсихрометрі?

- 1 людське знежирене волосся
- 2 «сухий» та «мокрый» терморезистори
- 3 плівка, що проводить вологу, нанесена на ізоляційну пластинку
- 4 електроди

14. Схема якого первинного вимірювального перетворювача наведена на рисунку?

- 1 термопари
- 2 фоторезистора



- 3 трансформаторного
- 4 електретного

15. Принцип вимірювань оснований на відомих в механіці залежностях деформацій та напруг в матеріалі від сил та тиску.

- 1 механічних величин
- 2 оптичних величин
- 3 теплових величин
- 4 хімічних величин

16. У якому витратомірі рідин принцип дії ґрунтується на законі електромагнітної індукції?

- 1 індуктивному
- 2 гальваномагнітному
- 3 індукційному
- 4 п'єзоелектричному

17. Пірометр – це вимірювальний прилад, який призначений для вимірювання температури.

- 1 контактного
- 2 безконтактного (дистанційного)
- 3 миттєвого
- 4 повільного

18. Аналізатори призначені для визначення ...

- 1 концентрації речовини в рідині
- 2 вологості
- 3 витрати рідини
- 4 вібрації

19. Розрахуйте граничне значення похибки мідного термометрового опору при вимірюванні температури $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо границі допустимих відхилень від номінальних статичних характеристик перетворення перетворювача дорівнюють $0,5 + 0,0065 \cdot |\Theta|$.

- | | | | |
|---|----------------------------------|---|---------------------------------|
| 1 | $1,0525\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 3 | $0,525\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| 2 | $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 4 | $5,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ |

ЧАСТИНА 3 ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

РОЗДІЛ 9.

ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ

9.1 Загальні положення

Вимірювання магнітних величини (магнітні вимірювання) – це галузь інформаційно-вимірjuвальної техніки, яка займається вимірюванням величин, що характеризують магнітне поле, магнітні кола, а також магнітні властивості речовин і матеріалів (ферромагнетиків).

Магнітне поле породжується рухом електричних зарядів (струмом) і характеризується напруженістю, яка не залежить від властивостей середовища, а визначається лише геометричними розмірами контуру та значенням струму в ньому.

Породжене електричним струмом, магнітне поле проявляється у формі силової дії на рухомий електричний заряд. Основною характеристикою силової взаємодії магнітного поля з електричним струмом є магнітна індукція - це індукція такого однорідного поля, в якому на кожний метр лінійного провідника зі струмом в один A діє сила в один H .

Основними величинами в галузі магнітних вимірювань є *магнітний потік*, Φ , $B\delta$, та *напруженість магнітного поля*, H , A/m . Ці величини зв'язані функціональними залежностями з іншими магнітними величинами, а саме

- *магнітна індукція*, B , $Tл$

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (9.1)$$

де S – площа контуру, через який проходить магнітний потік Φ ;

- *абсолютна магнітна проникність*, μ_a , $Gн/m$

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_0 = \frac{B}{H}, \quad (9.2)$$

де μ – відносна магнітна проникність;

μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$;

- намагнічувальна сила, А

$$F = I \cdot w = H \cdot L, \quad (9.3)$$

де I - струм, що протікає в замкнутому контурі з кількістю витків w ;

L – довжина середньої лінії магнітного потоку;

- магнітний опір, $Z_M, 1/\text{Гн}$

$$Z_M = \frac{H \cdot L}{\Phi} = R_M + jX_M, \quad (9.4)$$

де R_M, X_M - активна і реактивна складові магнітного опору;

- магнітна провідність, $G_M, \text{Гн}$

$$G_M = \frac{1}{Z_M}; \quad (9.5)$$

- магнітний момент $M_M, \text{А} \cdot \text{м}^2$ - це вектор, модуль якого дорівнює добутку площі контуру S на струм, а напрям якого перпендикулярний до площі контуру, згідно формули

$$M_M = I \cdot S. \quad (18.6)$$

Важливо характеристикою магнітних матеріалів є *феромагнітні втрати*, які визначаються потужністю, що виділяється при перемагнічуванні феромагнетиків змінним струмом. При вимірюванні магнітні величини перетворюються в електричні, які зручні для вимірювань.

Перетворювачі магнітних величин в електричні будуються на основі явищ електромагнітної індукції, ядерного магнітного резонансу, гальваномагнітного ефекту, в яких сукупність магнітних величин пов'язана з вихідними електричними величинами суворими функціональними залежностями.

Відповідно засоби вимірювань магнітних величини складаються з двох функціональних блоків – первинного вимірювального перетворювача магнітної

величини X в електричну величину Y та вторинного вимірювального приладу, який безпосередньо вимірює величину Y .

Сучасна практика потребує вимірювань параметрів сталих магнітних полів індукцією від 10^{-16} Тл до одиниць і навіть декількох десятків Тл, а також змінних – від $10^{15} \dots 10^{-14}$ Тл до декількох Тл в діапазоні частот від часток Гц до десятків МГц. Різноманітні й вимоги щодо точності – від $10^{-6} \dots 10^{-4}$ % у разі знаходження значень фізичних констант до $10^{-3} \dots 1,0$ % під час промислових вимірювань магнітної індукції.

9.2 Міри магнітних величин

Забезпечення єдності магнітних вимірювань ґрунтується на трьох первинних еталонах – магнітної індукції (напруженості магнітного поля), магнітного потоку та магнітного моменту, а також на відповідних зразкових мірах магнітних величин.

Еталони і міри магнітних величин використовують у схемах передачі розмірів магнітних величин від еталонів до робочих засобів вимірювань.

Зразкові та робочі міри магнітних величин застосовують для метрологічної повірки та градування відповідних вимірювальних приладів.

9.2.1 Еталони і міри магнітного потоку

Еталоном магнітної індукції в слабких магнітних полях є котушка Гельмгольца, яка виконана у формі кільця тороїдної форми, які побудовані на кварцовому каркасі діаметром 312 мм, при цьому відстань між ними дорівнює половині діаметра. Через котушку пропускають струм, а відтворення одиниці магнітної індукції Тл здійснюють через основні одиниці системи СІ – метр і ампер, розрахунковим методом. Еталон забезпечує відтворення одиниці магнітної індукції в діапазоні $5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ Тл із похибкою не більшою, ніж $\pm 0,00025$ %.

Метрологічною основою вимірювань середніх постійних магнітних полів у діапазоні від 0,005 Тл до 2,0 Тл є спеціальний еталон – електромагніт із стабі-

лізатором магнітної індукції в зазорі. Похибка відтворення одиниці магнітної індукції не перевищує $\pm 0,001 \%$.

Метрологічною основою вимірювань сильних постійних магнітних полів у діапазоні від 2,0 Тл до 10 Тл є спеціальний еталон – надпровідна котушка, яка відтворює одиницю магнітної індукції з похибкою, не більшою, ніж $\pm 0,001 \%$.

Міри магнітної індукції (напруженості магнітного поля) поділяють на дві групи:

- міри у формі котушок, по обмотках яких протікає електричний струм;
- у формі постійних магнітів.

В області слабких магнітних полів у діапазоні від 10^{-12} Тл до 10^{-2} Тл застосовують міри магнітної індукції у формі котушок Гельмгольца. Магнітна індукція такої міри визначається розрахунковим методом в залежності від форми котушки, виду її обмотки і кількості витків та сили струму в обмотці за виразом

$$B = \frac{16}{5\sqrt{5}} \cdot \mu_0 \cdot \frac{w}{D} \cdot I = k_B \cdot I, \quad (9.7)$$

де w – кількість витків обмотки;

D – середній діаметр котушки;

I – струм в обмотці;

k_B – стала міри магнітної індукції; $k_B = \frac{B}{I}; [Тл / А]$

Похибка відтворення одиниці магнітної індукції в таких мірах не перевищує 0,01 %.

В області середніх магнітних полів (0,05...2,0 Тл) міри магнітної індукції виконують у формі постійних магнітів, а в області сильних магнітних полів (2...20 Тл) - у формі потужних надпровідних котушок.

9.2.2 Еталони і міри магнітного потоку

Державний еталон магнітного потоку – це котушка Кемпбелла, первинна обмотка якої складається з двох однакових секцій, з'єднаних послідовно, а

вторинна обмотка з більшим діаметром розміщена у симетричній площині між секціями первинної обмотки.

За конструкцією котушка Кемпбелла є поєднанням міри напруженості магнітного поля та вимірювальної котушки. Магнітне поле, яке створене струмом в первинній обмотці (міра напруженості магнітного поля), пронизує витки вторинної обмотки (вимірювальної котушки). Потокочеплення ψ , яке виникає при значенні струму 1 А в намагнічувальній обмотці, має назву *стала міри магнітного потоку* $k_{\phi} = \frac{\psi}{I}; [Вб / А]$.

Номінальне значення сталої магнітного потоку $k_{\phi H} = 10^{-2} Вб/А$ знаходиться розрахунковим методом на основі геометричних розмірів котушки та кількості витків обмоток з похибкою, не більшою від $\pm 0,001 \%$.

Міри магнітного потоку застосовують для метрологічної перевірки та градування вимірювальних приладів магнітного потоку – веберметрів, флюксметрів, а також для визначення сталих вимірювальних котушок.

Міри магнітного потоку будують на основі котушок Кемпбелла та котушок Гельмгольца в поєднанні із розташованою в її центрі вторинною обмоткою, а також котушок з двома одношаровими обмотками, які розміщені на одному каркасі.

9.2.3 Еталони і міри магнітного моменту

Первинний еталон магнітного моменту побудований у формі еталонних вимірювальних котушок, намотаних на кварцові труби. Еталон забезпечує відтворення одиниці магнітного моменту з похибкою, не більшою від $\pm 0,05 \%$.

Міри магнітного моменту поділяються на дві групи:

- міри у формі вимірювальних котушок, по обмотках яких протікає струм;
- постійні магніти у формі еліпсоїдів обертання та циліндрів.

Основною характеристикою вимірювальної котушки є її стала k_{Sw} , яку визначають як добуток кількості витків w на площу S поперечного перерізу каркасу круглої або циліндричної форми

$$k_{Sw} = w \cdot S. \quad (9.8)$$

Магнітний момент визначається за значенням вимірюваного струму за виразом

$$M_M = k_{Sw} \cdot I. \quad (9.9)$$

Сталу вимірювальної котушки знаходять експериментально, похибка відтворення одиниці магнітного моменту за допомогою вимірювальних котушок становить 0,05...1,0 %.

9.3 Вимірювальні перетворювачі магнітних величин

Для вимірювання магнітних величин електричними методами їх необхідно перетворити в електричні величини, для цього застосовуються перетворювачі магнітних величин в електричні. Вимірювальні перетворювачі, вхідною величиною яких є магнітна величина, має назву *магнітовимірювальними* і залежно від виду вихідної величини поділяються на три основні групи:

- *магнітоелектричні перетворювачі* – вихідна величина електрична;
- *магнітомеханічні перетворювачі* – вихідна величина механічна;
- *магнітооптичні перетворювачі* – вихідна величина оптична.

Магнітоелектричні перетворювачі є найпоширенішими у галузі магнітних вимірювань є такими, що забезпечують найвищу точність вимірювання магнітних величин. Серед магнітоелектричних перетворювачів найпоширенішими є *індукційні, феромодуляційні, гальваноманітні та квантові*.

Розглянемо магнітоелектричні перетворювачі більш детально.

Індукційні магнітоелектричні перетворювачі.

Принцип дії індукційного перетворювача базується на явищі електромагнітної індукції. Найбільш поширеним видом індукційного перетворювача є *вимірювальна котушка* з кількістю витків w_k , яка розташовується в вимірювальному магнітному полі. При зміні магнітного потоку Φ_x , який проходить через площину S , охоплену витками вимірювальної котушки, виникає ЕРС $e = -w_k \cdot \frac{d\Phi_x}{dt}$.

В результаті відбувається перетворення магнітної величини в електричну – ЕРС або струм, що наводиться в колі котушки, після обробки електричної величини

вторинним вимірювальним приладом визначається магнітний потік Φ_x та пов'язані з ним магнітні величини. Таку вимірювальну котушку називають *індукційно-імпульсним перетворювачем*. В залежності від призначення вимірювальні котушки мають різну конструкцію – безкаркасні або з каркасом (круглі, квадратні, прямокутні), виготовлені із ізоляційного матеріалу; одношарові та з багатшаровою обмоткою.

Вимірювальні котушки застосовують для вимірювань характеристик як змінних, так й постійних магнітних полів.

Якщо *магнітне поле постійне*, то необхідно змінити магнітний потік, що зчіплюється з витками котушки. Змінити потокозчеплення можна одним із способів: швидко винести вимірювальну котушку за межі магнітного поля або повернути її на 180^0 ; обертати котушку в полі, що досліджується, зі сталою швидкістю; коливати котушку відносно її середнього положення.

Як інтегруючий вимірювальний прилад у магнітних вимірюваннях застосовують *веберметр*.

Для вимірювань параметрів *змінних магнітних полів* застосовують нерухомі вимірювальні котушки. Якщо крива магнітного потоку Φ_x симетрична відносно осі часу, то амплітуда наведеної в котушці ЕРС, E_m , пов'язана з амплітудою вимірюваного потоку Φ_{xm} співвідношенням

$$E_m = \omega \cdot w \cdot \Phi_{xm}. \quad (9.10)$$

Середнє випрямлене $E_{сеп}$ та середнє квадратичне значення E ЕРС пов'язані співвідношенням

$$E_{сеп} = \frac{E}{k_{\Phi_x}} = 4 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_{xm}, \quad (9.11)$$

де ω – колова частота зміни магнітного потоку;

f – циклічна частота зміни магнітного потоку;

k_{Φ_x} - коефіцієнт форми кривої потоку.

Для вимірювання магнітного потоку змінного магнітного поля за допомогою індукційних перетворювачів застосовують вторинні прилади середньовипрямлених та середньоквадратичних значень.

Феромодуляційні перетворювачі – ферозонди.

Це система із двох однакових стержневих магнітопроводів, які виконані з матеріалів з високою магнітною проникністю (пермалої), з нанесеними на кожний з них двома обмотками, причому $w_1 = w_2$. Обмотки мають назву *обмотки збудження*. Вони з'єднані таким чином, що створювані ними магнітні потоки направлені назустріч один одному.

Принцип дії таких перетворювачів полягає у використанні зміни магнітної проникності феромагнетика, який намагнічується змінним магнітним полем, при одночасній дії на нього постійного магнітного поля, напруженість якого вимірюється.

На рисунку 9.1 схематично зображений двох стержневий ферозонд із поздовжнім збудженням. Ферозонд складається з двох стержнів 1 і 2 із пермалою, на які намотані намагнічувальні обмотки w_{H1} та w_{H2} , з'єднані послідовно зустрічно. Вимірювальна котушка w_B охоплює обидва стержні.

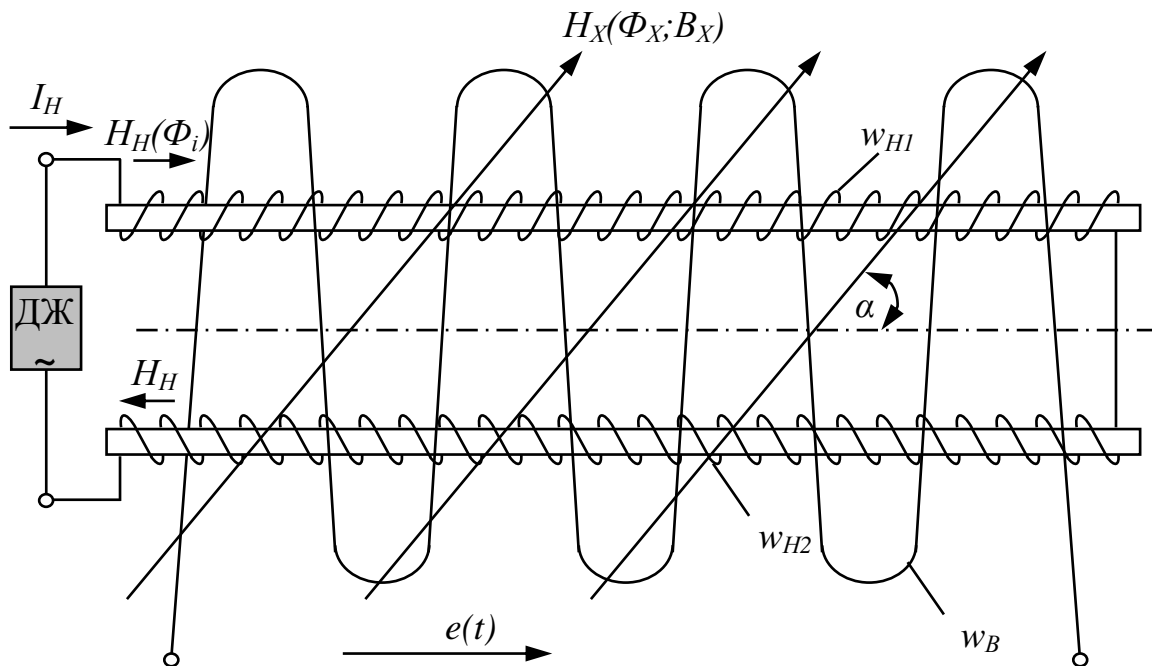


Рисунок 9.1 – Схематичне зображення ферозонда

Намагнічувальне поле H_H створюється намагнічувальним струмом I_H від джерела живлення (ДЖ) з частотою f , який протікає по намагнічувальним обмоткам w_{H1} та w_{H2} . Слід відзначити, що амплітуда намагнічувального поля H_{Hm} повинна бути достатньою для намагнічування стержнів до насичення.

При відсутності поля, що досліджується, та за умови повної ідентичності обох частин ферозонда ЕРС, яка наводиться у вимірювальній котушці дорівнює нулю, так як потоки симетричні.

Якщо ферозонд помістити в магнітне поле з напруженістю H_x , то потоки стають не симетричними: в одному стержні потоки Φ_M та Φ_x додаються, а в другому – віднімаються, як наслідок, у вимірювальній котушці наводиться ЕРС з парними гармоніками. Для виділення вимірювального інформативного сигналу застосовується фільтр, який налагоджений на другу гармоніку. Вона й несе інформацію щодо вимірювану індукцію (напруженість) магнітного поля.

Істотною перевагою ферозондів є їх висока чутливість і здатність вимірювати характеристики як постійних, так й змінних магнітних полів від 10^{-14}Тл з похибкою $\pm (1 \dots 2) \%$.

Гальваномагнітні перетворювачі.

У гальваномагнітних перетворювачах використовуються ефекти, що виникають у напівпровідниках або металах зі струмом, які знаходяться в магнітному полі. Такі ефекти основані на зміні їх електричного стану або фізичних властивостей під дією магнітного поля.

Найбільш широко для магнітних вимірювань використовуються ефект Холла та ефект Гаусса. Перетворювачі, які побудовані на ефекті Холла, мають назву *перетворювачі Холла* або *магнітогенератори*, а перетворювачі, які побудовані на ефекті Гаусса – *магніторезистори*.

Розглянемо *перетворювачі Холла* більш детально. Принцип дії перетворювачів Холла полягає у виникненні на гранях провідної пластини – рисунок 9.2, поперечної ЕРС E_x , поміщеної в магнітне поле перпендикулярно до вектора магнітної індукції B , за умови, що в повздовжньому напрямі по ній протікає струм I .

Різниця потенціалів, яка виникає між гранями пластини, має назву ЕРС Холла, вона пов'язана з вимірюваною магнітною індукцією співвідношенням

$$E_x = \frac{R_x \cdot I \cdot B}{d}, \quad (18.12)$$

де R_x – постійна Холла, яка залежить від властивостей матеріалу пластини;

I – струм;

B – магнітна індукція;

d – товщина пластини.

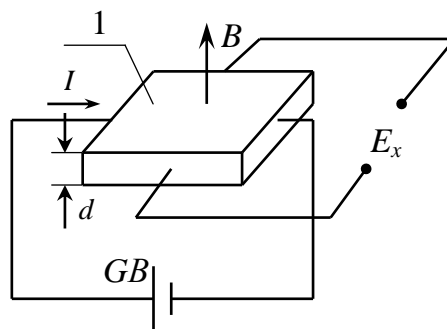


Рисунок 9.2 – Схема перетворювача Холла

Пластина (1) перетворювача Холла має малі розміри (до 1...1,5 мм), тому за допомогою такого перетворювача можна вимірювати магнітну індукцію в малих зазорах. Матеріали для виготовлення пластини перетворювача Холла – це германій, кремній, арсенід галію, сурм'янистий індій.

Перетворювачі Холла застосовуються для вимірювання як постійних, так й змінних магнітних полів у широкому діапазоні частот. Похибка перетворювачів складає $\pm(1...3)\%$. Недоліками перетворювачів є невисока чутливість та сильна залежність постійної Холла від температури.

Перетворювачі Гаусса – це такі перетворювачі, які використовують ефект Гаусса та мають назву магніторезистори. Ефект Гаусса полягає у зміні опору деяких матеріалів при внесенні їх у магнітне поле. Для виготовлення таких перетворювачів використовують вісмут, сурм'янистий нікель.

Вихідною величиною магніторезисторів є відносна зміна опору матеріалу під дією магнітної індукції. Найбільшу відносну зміну дає перетворювач, який

має форму диску з електродом в центрі та електродом у вигляді обода на диску (диск Корбіно – див. пункт 8.2, розділ 8).

Гальваномагніторекombінаційні перетворювачі (ГМРП) основані на зміні середньої концентрації носіїв заряду під дією магнітного поля, що проявляється у провідниках, які мають поверхні з різною швидкістю рекомбінації носіїв заряду. На рисунку 9.3 наведена пластина ГМРП.

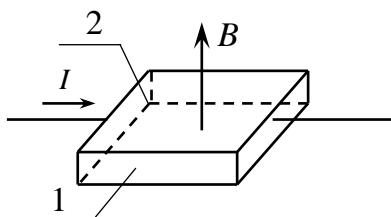


Рисунок 9.3 – Пластина ГМРП

За конструкцією ГМРП – це тонка напівпровідникова пластина, у якої одна з бокових поверхонь (1) оброблена грубо, а поверхня (2) відполірована. Внаслідок цього біля поверхні (1) швидкість рекомбінації носіїв зарядів на 2...3 порядки більша, ніж біля поверхні (2).

При розміщенні пластини в магнітному полі під дією сили Лоренца відбувається зміщення носіїв зарядів до однієї з бокових поверхонь. Якщо напрям вектора магнітної індукції такий, що заряди перемішуються до поверхні (1), то загальна концентрація носіїв зарядів зменшується, а опір перетворювачів зростає. При зворотному напрямі вектора індукції опір ГМРП зменшується.

Отже, на відміну від магніторезисторів у ГМРП зміна опору залежить від напрямку вектора магнітної індукції. При незмінному напрямі вектора індукції зміни знака приросту опору можна досягти зміною напрямку струму. В магнітному полі ГМРП має властивості, аналогічні властивостям діода.

Ядерні перетворювачі.

Такі перетворювачі магнітної індукції належать до групи *квантових перетворювачів*, робота яких основана на взаємодії мікрочастинок з магнітним полем, такими мікрочастинками є ядра атомів речовини, яка має момент кіль-

кості руху. Відношення магнітного моменту мікрочастинки до її механічного моменту має назву *гіромагнітне відношення* і позначається γ .

Магнітні моменти ядер речовини, яка внесена в постійне магнітне поле, орієнтуються в напрямку цього поля. При зміні напрямку зовнішнього поля ядерний магнітний момент починає прецесувати відносно нового напрямку вектора магнітної індукції, а саме, вектор магнітного моменту буде обертатись з частотою $\omega = \gamma \cdot B$ відносно вектора магнітної індукції, створюючи конус з кутом φ при вершині. З часом процес затухає, при цьому кут φ прецесії прямує до нуля, а речовина набуває стаціонарної намагніченості, вектор якої збігається з новим напрямком вектора магнітної індукції зовнішнього поля.

Для вимірювань магнітної індукції слабких магнітних полів використовують тесламетри на базі ядерного магнітного резонансу (*ЯРМ-тесламетри*), які ґрунтуються на принципі вільної ядерної прецесії – рисунок 9.4.

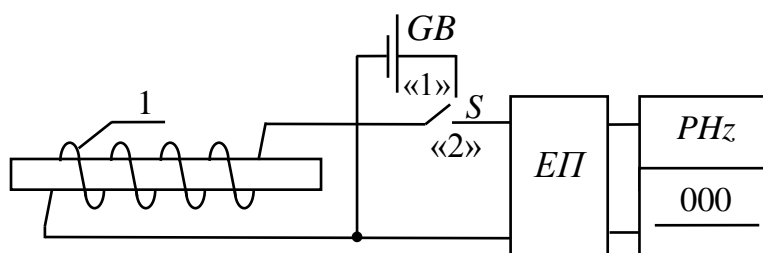


Рисунок 9.4 – Схема ЯРМ-тесламетра за методом вільної ядерної прецесії

Перетворювач для вимірювання слабких магнітних полів на основі ядерного магнітного резонансу має ампулу з водою 1 як з робочою речовиною, яка розташована всередині котушки індуктивності. При пропусканні струму через котушку індуктивності (перемикач S у положенні «1») створюється попередня поляризація в напрямі вектора магнітної індукції, який перпендикулярний до вектора індукції вимірюваного поля. Потім котушка індуктивності відмикається від джерела живлення (перемикач S у положенні «2»), вимірюється частота ЕРС, що наводиться в котушці за рахунок прецесії. Наведена ЕРС підсилюються електронним підсилювачем ЕП, а її частоту вимірює цифровий частотомір PHz.

За значенням вимірної частоти прецесії визначається значення магнітної індукції. Так як частоту прецесії за допомогою цифрових частотомірів можна виміряти з похибкою, меншою від $\pm 10^{-4}\%$, то магніторезонансний перетворювач забезпечує можливість вимірювання магнітної індукції з похибкою, меншою від $\pm 0,005\%$. Найпоширеніші магніторезонансні перетворювачі для вимірювання магнітної індукції в діапазоні від 0,0001 до 0,1 Тл з абсолютною похибкою $\pm (0,02 \dots 2,0)$ Тл.

9.4 Вимірювання магнітного потоку

Розглянемо вимірювання сталого магнітного потоку індукційно-імпульсним методом. Суть методу полягає у тому, що вимірювальний магнітний потік Φ_x , який перетинає витки рухомої вимірювальної котушки, викликає в ній появу ЕРС, значення якої знаходять за формулою

$$e_x(t) = -\frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\Phi_x}{dt}. \quad (9.13)$$

Для вимірювання сталого магнітного потоку індукційно-імпульсним методом використовується спеціальний прилад – *веберметр*, основу якого становить магнітоелектричний вимірювальний механізм. Від звичайного магнітоелектричного вимірювального механізму він відрізняється тим, що в ньому відсутні протидіючі пружинки, а струм до рухомої рамки підводиться за допомогою струмопроводів з незначним протидіючим моментом. Кут повороту α рухомої частини буде пропорційний до імпульсу ЕРС $e_x(t)$, яка наводиться у вимірювальній котушці, яка підключена до рамки вимірювального механізму приладу

$$\alpha = S_\phi \int_0^\tau e_x(t) dt = S_\phi \cdot w \cdot \Phi_x, \quad (9.14)$$

де S_ϕ – чутливість веберметра по магнітному потоку.

Покази веберметрів пропорційні до вимірювального потоку Φ_x і практично не залежать від опору зовнішнього кола, що дає можливість градуювати шкалу приладу безпосередньо в одиницях магнітного потоку.

Приклад 9.1 Оцінити відносну та абсолютну похибки вимірювання магнітного потоку $\Phi_X = 5$ мВб мілівеберметром, якщо вимірювальна котушка має один виток опором 10 Ом, а границя допустимої зведеної основної похибки дорівнює 1%.

Розв'язання Відносна похибка дорівнює

$$\delta_{\Phi_{\text{зр}}} = \pm \gamma_{\text{зр}} \frac{\Phi_K}{\Phi_X} = \pm 1,0 \frac{10}{5,0} = \pm 2,0\% ,$$

а абсолютна похибка дорівнює $\Delta_{\Phi_{\text{зр}}} = \pm \frac{\delta_{\Phi_{\text{зр}}} \cdot \Phi_K}{100} = \pm \frac{\gamma_{\text{зр}} \cdot \Phi_K}{100} = \pm \frac{1,0 \cdot 1,0}{100} = \pm 0,01$ мВб.

Розглянемо вимірювання періодично змінного магнітного потоку.

Суть метода вимірювання змінного потоку Φ_X полягає у тім, що в нерухомій вимірювальній котушці наводиться ЕРС $e_X(t)$, яка вимірюється за допомогою вольтметра – рисунок 9.5. Якщо крива потоку симетрична відносно осі часу, то його амплітудне значення дорівнює

$$\Phi_m = \frac{E_{\text{сеп}}}{4f \cdot w} , \tag{9.15}$$

де $E_{\text{сеп}}$ – середньо випрямлене значення ЕРС $e_X(t)$, В;

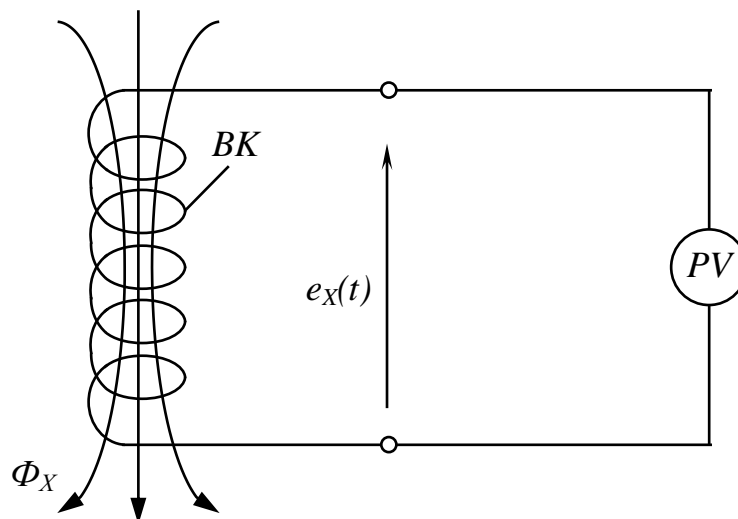


Рисунок 9.5 – Схема вимірювання змінного магнітного потоку за допомогою вимірювальної котушки

Значення Φ_X визначається також за формулою

$$\Phi_m = \frac{E}{4f \cdot W \cdot k_{\Phi_X}}, \quad (9.16)$$

де E – середньоквадратичне або діюче значення ЕРС $e_X(t)$, В;

k_{Φ_X} – коефіцієнт форми кривої потоку Φ_X .

Формулою (9.16) користуються лише тоді, коли форма кривої потоку точно відома і відоме значення k_{Φ_X} , наприклад, для синусоїдної форми $k_{\Phi_X} = 1,11$. Загалом магнітний потік має спотворену форму кривої, яка відмінна від синусоїдної, тому то для уникнення похибки від форми кривої доцільнішим є вимірювання $E_{сер}$ вольтметром середніх значень та обчислення Φ_m за формулою (9.15).

Вимірювання ЕРС за допомогою вольтметра неодмінно призводить до виникнення похибки методу, яка зумовлена споживанням енергії самим приладом, значення цієї похибки буде тим меншим, чим більший опір вольтметра. Похибка вимірювання магнітного потоку δ_Φ за цим методом відповідно до (9.15) дорівнює

$$\delta_\Phi = \delta_U + \delta_f; \quad (9.17)$$

$$\delta_U = \delta_{PV} + \delta_{методу}, \quad (9.18)$$

де δ_U – похибка вимірювання ЕРС $e_X(t)$ вольтметром;

δ_f – похибка вимірювання частота;

δ_{PV} – похибка вольтметра;

$\delta_{методу}$ – похибка методу.

Приклад 9.2 Вибрати вольтметр для вимірювання змінного потоку несинусоїдної форми, приблизне значення якого $0,3 \text{ мВб}$ за допомогою вимірювальної котушки, яка має 100 витків і опір 10 Ом на промисловій частоті 50 Гц .

Оцінити відносну і абсолютну похибки вимірювання потоку.

Розв'язання 1. Так як вимірюваний потік має несинусоїдну форму з невідомим коефіцієнтом форми, то для вимірювань обираємо електронний вольтметр се-

редньовипрямлених значень типу Ф5053 з такими метрологічними характеристиками:

- границя основної зведеної похибки на межі вимірювання 1 мВ становить $\pm 1,5 \%$;

- границя основної зведеної похибки на межі вимірювання 3,0 мВ становить $\pm 1,0 \%$;

- границя основної зведеної похибки на межах вимірювання 10; 30; 100; 300 мВ становить $\pm 0,5 \%$;

- границя основної зведеної похибки на межах вимірювання 1; 10; 30; 100; 300 В становить $\pm 0,5 \%$;

- нормальний частотний діапазон 40 Гц...100 кГц;

- вхідний опір вольтметра не менше за 10 МОм.

2. Для вибору межі вимірювання вольтметра необхідно визначити приблизне значення $E_{сеп}$ ЕРС $e_X(t)$, яке визначається з (9.15)

$$E_{сеп} = 4 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m = 4 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 60В.$$

Обираємо найближчу межу вимірювання вольтметра $U_K = 100 В$.

3. Граничне значення основної відносної похибки вольтметра визначаємо за формулою

$$\delta_{PV_{сп}} = \pm \gamma_{PV_{сп}} \cdot \frac{U_K}{U_X} = \pm 0,5 \cdot \frac{100}{60} = \pm 0,83\%.$$

4. Похибку методу вимірювання визначаємо за формулою

$$\delta_{методу} = -\frac{R_{BK}}{R_{PV}} = -\frac{10}{10 \cdot 10^7} = -10^{-5}\% < \delta_{PV_{сп}} = \pm 0,83\%.$$

5. Так як частота мережі живлення точно відома ($f = 50 Гц$), отже $\delta_f = 0\%$, тоді відносна похибка δ_Φ вимірювання магнітного потоку Φ_x визначається тільки основною похибкою вольтметра, а її граничне значення дорівнює $\delta_{\Phi_{сп}} = \delta_{PV_{сп}} = \pm 0,83\%$.

Граничне значення абсолютної похибки вимірювання магнітного потоку Φ_x знаходимо за формулою

$$\Delta_{\Phi_{cp}} = \pm \frac{\delta_{\Phi_{cp}} \cdot \Phi_x}{100} = \pm \frac{0,83 \cdot 0,3}{100} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ мВб.}$$

9.5 Вимірювання магнітної індукції та напруженості магнітного поля

Для вимірювання індукції магнітного поля використовуються спеціальні вимірювальні прилади – *тесламетри*. Перетворювачі в таких приладах – це перетворювачі Холла. На гранях перетворювачів Холла виникає ЕРС, значення якої пропорційне магнітній індукції, в подальшому ця ЕРС підсилюється вимірювальним підсилювачем і надходить для вимірювання до магнітоелектричного мілівольтметром, покази якого при сталому значенні струму градуйовані безпосередньо в одиницях магнітної індукції.

Перевагами приладів з перетворювачами Холла є можливість вимірювань як у постійних, так і у змінних магнітних полях, малі габарити самого перетворювача і досить висока точність вимірювань. Недоліком є порівняно велика залежність ЕРС від температури, що вимагає спеціальної температурної компенсації.

Для вимірювання магнітної індукції та напруженості магнітного поля призначений *метод амперметра та вольтметра*, який є найпростішим методом визначення *динамічних характеристик магнітних матеріалів*, тобто характеристик у змінному магнітному полі.

Вимірювання здійснюються за схемою, що наведена на рисунку 9.6.

На зразок із досліджуваного магнітного матеріалу намотують дві обмотки: намагнічувальну із кількістю витків w_1 і вимірювальну із кількістю витків w_2 . Через намагнічувальну обмотку від звукового генератора ЗГ пропускають намагнічувальний струм I , значення якого вимірюють амперметром. Вольтметром PVI вимірюють ЕРС $e_2(t)$ вторинної обмотки.

Якщо активний опір намагнічувальної котушки w_1 великий, то намагнічувальний струм I та напруженість магнітного поля H практично синусоїдні, а індукція B – несинусоїдна.

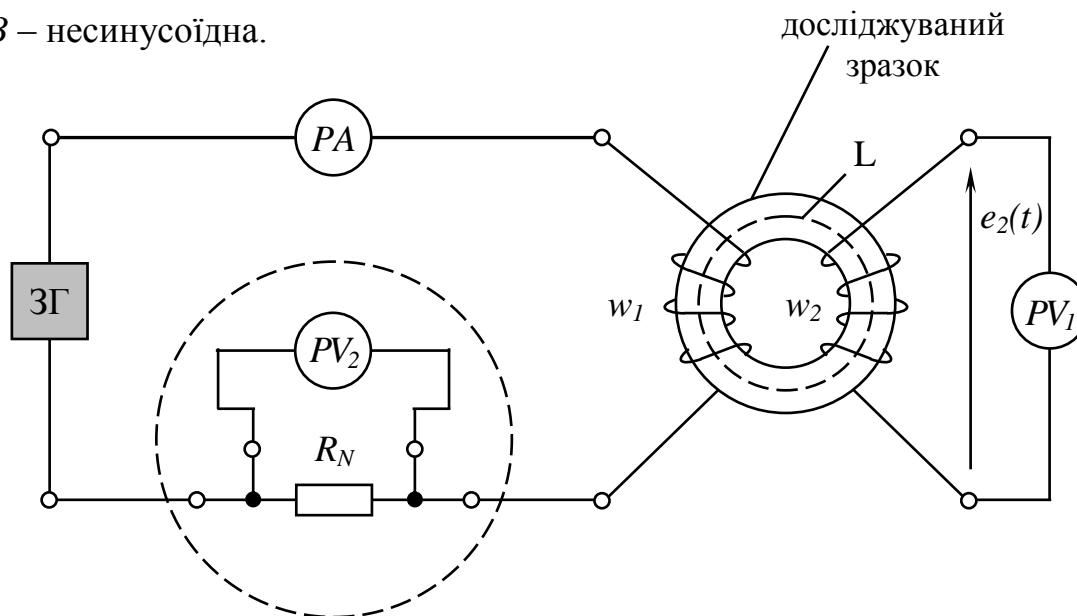


Рисунок 9.6 – Схема вимірювання магнітної індукції та напруженості магнітного поля за методом амперметра та вольтметра

За допомогою амперметра середньоквадратичних значень вимірюються середньоквадратичні значення намагнічувального струму I , а амплітудне значення напруженості магнітного поля H_m визначається за виразом

$$H_m = \frac{w_1 \cdot I \cdot \sqrt{2}}{L}, \quad (9.19)$$

де L – довжина середньої лінії магнітного потоку в зразку із досліджуваного матеріалу, m .

Для визначення амплітудного значення B_m несинусоїдної магнітної індукції необхідно вольтметром середньовипрямлених значень виміряти середнє значення ЕРС $e_2(t)$, наведеної в обмотці w_2 , тоді

$$B_m = \frac{E_{сеп}}{4 \cdot f \cdot w_2 \cdot S}, \quad (9.20)$$

де S – площа поперечного перерізу зразка, m^2 .

Якщо активний опір намагнічувальної обмотки малий, то практично забезпечується режим синусоїдної магнітної індукції, а напруженість магнітного поля буде несинусоїдною. У такому разі амплітудне значення H_m напруженості магнітного поля, знайдене за виразом (9.18), може істотно (на 8...10 %) відрізнятись від істинного значення максимальної напруженості.

Точніше максимальне значення напруженості можна встановити за показами вольтметра $PV2$, який вимірює спад напруги на зразковому резисторі R_N , при цьому

$$H_m = \frac{w_1 \cdot I_m}{L} = \frac{w_1}{L} \cdot \frac{U_m}{R_N}. \quad (9.21)$$

Для вимірювання синусоїдної ЕРС $e_2(t)$, яка наводиться в обмотці w_2 , слід застосовувати вольтметр середньоквадратичних значень, при цьому максимальне значення B_m індукції визначається за формулою

$$B_m = \frac{E}{4 \cdot f \cdot w_2 \cdot S \cdot k_\phi}, \quad (9.22)$$

де k_ϕ – коефіцієнт форми кривої ЕРС (для синусоїди $k_\phi = 1,1$).

Діапазони вимірювань магнітної індукції та напруженості магнітного поля методом амперметра та вольтметра, а також частотний діапазон і точність вимірювань повністю визначаються характеристиками використаних приладів. Застосування сучасних прецизійних електронних та цифрових амперметрів та вольтметрів має змогу розширити можливості амперметра і вольтметра.

Як було зазначено в пункті 9.3 найвищу точність та чутливість вимірювання магнітної індукції забезпечують квантові перетворювачі у складі ЯМР-тесламетра та ферозонди у складі феромодуляційного тесламетра.

9.6 Вимірювання феромагнітних втрат

Під час перемагнічування феромагнітного матеріалу змінним струмом наявна втрата потужності, яка зумовлена втратами на гістерезис і вихрові струми, які загалом мають назву *феромагнітні втрати*. Такі втрати можна виміряти

за допомогою ватметра (амперметр і вольтметр використовуються для контролю струму та напруги, які подаються на ватметр) – рисунок 9.7.

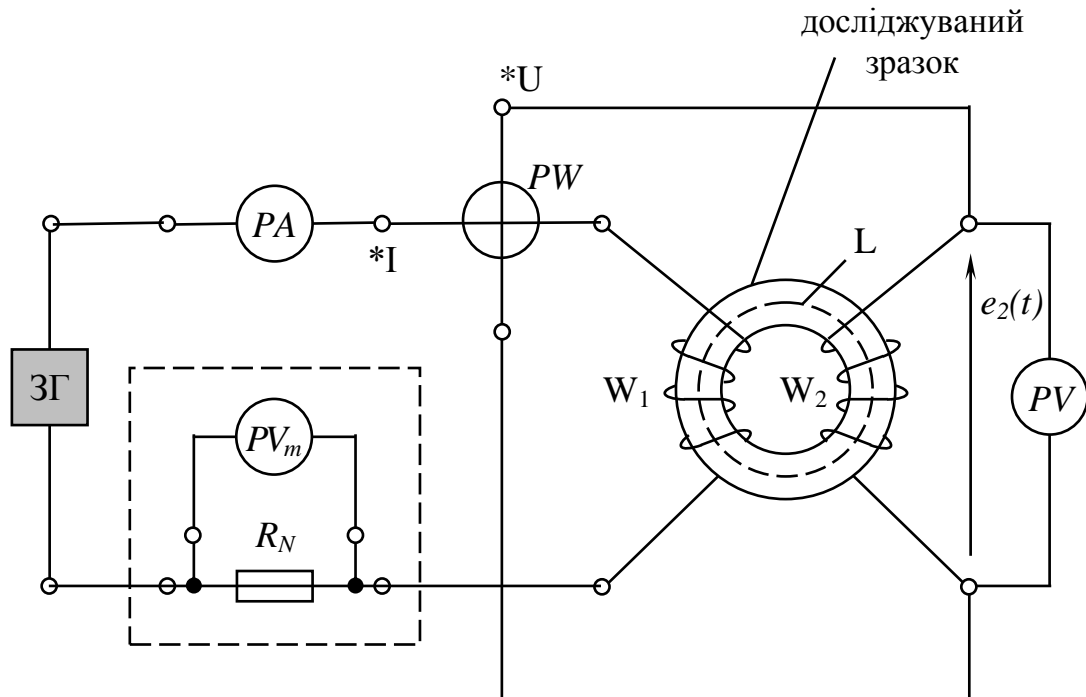


Рисунок 9.7 – Схема вимірювання феромагнітних втрат за допомогою ватметра

Включення кола напруги ватметра до вторинної обмотки w_2 досліджуваного зразку дає змогу вимірювати тільки втрати в сталі, однак у такому разі необхідно покази ватметра приводити до намагнічувальної обмотки, тобто помножувати на відношення $\frac{w_1}{w_2}$. Потужність феромагнітних втрат дорівнює

$$P_{BTP} = P_{PW} \frac{w_1}{w_2}. \quad (9.23)$$

При вимірюванні малих потужностей доцільно користуватись ватметрами з $\cos\varphi=0,1$, а також вводити поправку для виключення похибки методу, зумовленої споживанням енергії самими приладами, отже P_{BTP} визначається за формулою

$$P_{BTP} = P_{PW} \cdot \frac{w_1}{w_2} - U^2 \cdot \left(\frac{1}{R_{PV}} + \frac{1}{R_{PWU}} \right), \quad (9.24)$$

де U – показ вольтметра, B ;

R_{PV} , R_{PWU} – опори вольтметра та кола напруги ватметра відповідно, Ом .

Якщо необхідно, коло струму ватметра можна вмикати через вимірювальний трансформатор струму.

Феромагнітні втрати можна також вимірювати за допомогою компенсаторів і мостів змінного струму, однак порівняно з вищенаведеним методом ватметра ці методи не поширені.

Приклад 9.3 Вибрати ватметр, вольтметр та амперметр для вимірювання феромагнітних втрат у зразку з електротехнічної сталі з такими даними: $H_m = 50 \text{ А/м}$; $B_m = 0,5 \text{ Тл}$; $L = 0,14 \text{ м}$; $S = 10^{-3} \text{ м}^2$; $w_1 = 100$; $w_2 = 200$; $f = 50 \text{ Гц}$; режим синусоїдної напруженості магнітного поля.

Розв’язання 1. Діюче значення струму визначаємо з виразу (9.19)

$$I = \frac{H_m \cdot L}{\sqrt{2} \cdot w_1} = \frac{50 \cdot 0,14}{\sqrt{2} \cdot 100} = 0,049 \text{ А.}$$

2. ЕРС $e_2(t)$ визначаємо з виразу (18.20)

$$E_{\text{сеп}} = 4 \cdot f \cdot w_2 \cdot S \cdot B_m = 4 \cdot 50 \cdot 200 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 = 20 \text{ В.}$$

3. Значення потужності феромагнітних втрат визначаємо за виразом

$$P_{\text{ВТР}} = I \cdot E_{\text{сеп}} \cdot k_{\Phi} \cdot \cos \varphi_X = 0,049 \cdot 20 \cdot 1,11 \cdot 0,6 = 0,65 \text{ Вт.}$$

4. Вибираємо прилади згідно завдання:

- амперметр діючих значень електромагнітної системи; тип Э524; клас точності 0,5; границя вимірювання $I_K = 50 \text{ мА}$;

- вольтметр середньо випрямлених значень; тип Ф5053; клас точності 0,5; границя вимірювання $U_K = 30 \text{ В}$; вхідний опір 10 МОм ;

- ватметр електродинамічної системи; тип Д5004/7; клас точності 0,5; границя вимірювання за напругою $U_{KPW} = 30 \text{ В}$; границя вимірювання за струмом $I_{KPW} = 50 \text{ мА}$; $\cos \varphi_{HPW} = 1,0$; $R_{UPW} = 10 \text{ кОм}$; кількість поділок на шкалі 150.

5. Граничне значення основної похибки ватметра визначаємо за виразом

$$\delta_{P_{W_{zp}}} = \pm \gamma_{P_{W_{zp}}} \cdot \frac{P_K}{P_{PW}} = \pm 0,5 \cdot \frac{30 \cdot 0,05 \cdot 1,0}{0,65} = \pm 0,6\%.$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 9

- 1 Поясніть принцип індукційного перетворювача магнітного потоку на прикладі вимірювальної котушки.
- 2 Поясніть принцип дії диференціального ферозонда.
- 3 Поясніть принцип феромодуляційного тесла метра.
- 4 Поясніть принцип дії ЯРМ-тесламера за методом вільної ядерної прецесії.
- 5 Поясніть суть індукційно-імпульсного методу визначення магнітних петель гістерезису.
- 6 Поясніть суть ватметрового методу вимірювання питомих магнітних втрат.
- 7 Які існують методи для вимірювання магнітного потоку в постійних та в змінних магнітних полях?
- 8 Поясніть принцип дії гальваномагніторекombінаційних перетворювачів.
- 9 Опишіть принцип дії гальваномагнітних перетворювачів та магніторезистивних перетворювачів.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДО РОЗДІЛУ 9

- 1 Оцінити відносну та абсолютну похибки вимірювання магнітного потоку $\Phi_x = 7,5 \text{ мВб}$ мілівеберметром типу М1119, якщо вимірювальна котушка має один виток опором 20 Ом, а верхня границя вимірювання приладу дорівнює 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10 мВб, границя зведеної основної похибки дорівнює $\pm 1,0 \%$, опір джерела сигналу - 30 Ом.
- 2 Оцінити відносну і абсолютну похибки вимірювання індукції $B_x = 0,2 \text{ Тл}$ теслаамперметром типу Ф4355, якщо верхня границя вимірювання приладу дорівнює 10; 50; 100; 500; 1000; 1500 мТл, границя зведеної основної похибки приладу $\pm 2,5 \%$.
- 3 Вибрати оптимальну межу вимірювання вольтметра Ф5053 і оцінити відносну та абсолютну похибки вимірювання магнітного потоку $\Phi_x = 5,0 \text{ мкВб}$ за допо-

могою вимірювальної котушки, яка має 200 витків і опір 20 Ом, на частоті 400 Гц (прийняти, що $\delta_f = \pm 0,01 \%$). Метрологічні характеристики завданого вольтметра: назва – вольтметр середньовипрямлених значень; тип - Ф5053; клас точності - 0,5; 1,0; 1,5; границя вимірювання 1,0 мВ (кл.точн. 1,5); 3,0 мВ (кл.точн. 1,0); 10-30-100-300 мВ (кл.точн. 0,5); внутрішній опір приладу – 10 МОм.

4 Вибрати ватметр, вольтметр та амперметр для вимірювання феромагнітних втрат у зразку з електротехнічної сталі з такими даними: $H_m = 200$ А/м; $B_m = 1,5$ Тл; $L = 0,2$ м; $S = 10^{-4}$ м²; $w_1 = 1000$; $w_2 = 800$; $f = 50$ Гц; режим синусоїдної напруженості магнітного поля. Оцінити відносну похибку вимірювання втрат.

5 Вибрати вольтметр та амперметр для визначення динамічних характеристик зразку з електротехнічної сталі з такими даними: $H_m = 100$ А/м; $B_m = 1,5$ Тл; $L = 0,16$ м; $S = 10^{-4}$ м²; $w_1 = 100$; $w_2 = 100$; $f = 50$ Гц; режим синусоїдної напруженості магнітного поля.

Оцінити абсолютну і відносну похибку вимірювання магнітної індукції і напруженості магнітного поля.

ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 9

1. Галузь інформаційно-вимірювальної техніки, яка займається вимірюванням величин, що характеризують магнітне поле, магнітні кола, а також магнітні властивості речовин і матеріалів (феромагнетиків), має назву ...

- 1 вимірювання фізичних величин
- 2 вимірювання неелектричних величин
- 3 вимірювання електричних величин
- 4 вимірювання магнітних величин

2. Вимірювальні перетворювачі, входною величиною яких є магнітна величина – це ...

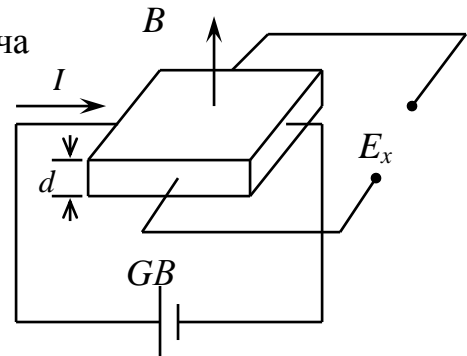
- 1 датчики
- 2 вторинні вимірювальні прилади
- 3 первинні вимірювальні перетворювачі
- 4 магнітовимірювальні перетворювачі

3. До яких магнітовимірювальних перетворювачів належать індукційні, феромодуляційні, гальваноманітні та квантові перетворювачі?

- 1 до магнітоелектричних перетворювачів
- 2 до магнітомеханічних перетворювачів
- 3 до магнітооптичних перетворювачів
- 4 до перетворювачів магнітного потоку

4. Схема якого магнітоелектричного перетворювача наведена на рисунку?

- 1 магніторезистор
- 2 ферозонд
- 3 перетворювач Холла
- 4 вимірювальна котушка



5. Яке призначення веберметра?

- 1 для вимірювання сталого магнітного потоку індукційно-імпульсним методом
- 2 для вимірювання магнітної індукції
- 3 для вимірювання феромагнітних втрат
- 4 для вимірювання періодично змінного магнітного потоку

6. Яке призначення тесламетра?

- 1 для вимірювання сталого магнітного потоку індукційно-імпульсним методом
- 2 для вимірювання періодично змінного магнітного потоку
- 3 для вимірювання феромагнітних втрат
- 4 для вимірювання магнітної індукції

7. Які магнітовимірювальні перетворювачі застосовуються в тесламетрі?

- 1 магніторезистори
- 2 ферозонди
- 3 вимірювальні котушки
- 4 перетворювачі Холла

8. Яке фізичне явище (ефект) є основою принципу дії гальваномагнітних перетворювачів?

- 1 атомні, ядерні та електронні резонансні явища
- 2 явище електромагнітної індукції
- 3 ефект Холла та ефект Гаусса
- 4 зовнішній фотоефект

9. Що є еталоном магнітної індукції в слабких магнітних полях?

- 1 електромагніт із стабілізатором магнітної індукції в зазорі
- 2 котушка Кемпбелла
- 3 котушка Гельмгольца
- 4 еталонна вимірювальна котушка

10. Що є Державним еталоном магнітного потоку?

- 1 електромагніт із стабілізатором магнітної індукції в зазорі
- 2 котушка Кемпбелла
- 3 котушка Гельмгольца
- 4 еталонна вимірювальна котушка

11. Що таке первинний еталон магнітного моменту?

- 1 еталонна вимірювальна котушка
- 2 електромагніт із стабілізатором магнітної індукції в зазорі
- 3 котушка Кемпбелла
- 4 котушка Гельмгольца

12. Розрахуйте величини чутливості мілівеберметра, якщо межа вимірювання приладу дорівнює 5 мВб та 10 мВб , а кількість поділок на шкалі приладу – 100.

- 1 10 поділ/мВб
- 2 $0,05 \text{ мВб/поділ}$
- 3 20 поділ/мВб та 10 поділ/мВб
- 4 20 поділ/мВб

13. Яке призначення ферометра?

- 1 для вимірювання магнітної індукції
- 2 для вимірювання сталого магнітного потоку

3 для вимірювання параметрів феромагнітних матеріалів у змінних магнітних полях

4 для вимірювання феромагнітних втрат

14. Який прилад необхідно застосовувати для вимірювання періодично змінного магнітного потоку?

1 веберметр

2 вольтметр

3 тесламетр

4 ватметр

15. Принцип дії яких перетворювачів оснований на зміні внутрішнього опору напівпровідників внаслідок відхилення траєкторії носіїв заряду від лінійної під впливом зовнішнього магнітного поля?

1 перетворювачів Холла

2 квантових перетворювачів

3 ферозондів

4 магніторезистивних перетворювачів

16. Принцип дії яких перетворювачів оснований на використанні явищ, які виникають взаємодії мікрочастинок речовини (ядер, атомів, електронів) з магнітним полем?

1 магніторезистивних перетворювачів

2 квантових перетворювачів

3 перетворювачів Холла

4 індукційних перетворювачів

17. Як аналітично визначається потужність феромагнітних втрат за методом ватметра з урахуванням поправки для виключення похибки методу?

$$1 \quad P_{ВТР} = P_{PW} \cdot \frac{w_1}{w_2} - U^2 \cdot \left(\frac{1}{R_{PV}} + \frac{1}{R_{PWU}} \right)$$

$$2 \quad H_m = \frac{W_1 \cdot I_m}{L} = \frac{W_1}{L} \cdot \frac{U_m}{R_N}$$

$$3 \quad P_{BTP} = P_{PW} \cdot \frac{W_1}{W_2}$$

$$4 \quad B_m = \frac{E_{cep}}{4 \cdot f \cdot W_2 \cdot S}$$

18. Оцінити абсолютну похибку вимірювання магнітної індукції 0,2 Тл теслаамперметром, у якого верхня границя вимірювання дорівнює 500 мТл, а клас точності 2,5.

- | | | | |
|---|-------------------|---|---------|
| 1 | 0,0125 Тл | 3 | 12,5 Тл |
| 2 | (0,2 ± 0,0125) Тл | 4 | 1,25 Тл |

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алиев Т.М. Измерительная техника: учебник. / Т.М. Алиев, А.А.Тер-Хачатуров. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
2. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: учебник. / Э.Г.Атамалян. – М.: Высшая школа, 1989. – 375 с.
3. Бондаренко В.І. Методи і засоби вимірювання електричних величин у прикладах та задачах: навч. Посібник. / В.І. Бондаренко, О.П. Давиденко, В.І. Дякін. – К.: УМКВО, 1990. – 157 с.
4. Головка Д.Б. Основи метрології та вимірювань: підручник. / Д.Б.Головка, К.Г. Рего, Ю.О.Скрипник. – К.: Либідь, 2001. – 408 с.
5. Гуржій А.М. Електричні і радіотехнічні вимірювання / А.М. Гуржій, Н.І. Поворознюк – К.: Нав. книга, 2002. – 287 с.
6. 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.
7. 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.
8. ДСТУ ISO 10012:2005 Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. - 19 с.
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. Кремлівський П.П. Витратоміри й лічильники кількості речовин. Кн.1: навч. посіб. – К.: Вид-во «Політехніка», 2002. – 412 с.

12. 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.
13. 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.
14. Метрологія. Терміни та визначення: ДСТУ 2681-94. – [Чинний від 1995-01-01]. – К. Держстандарт України, 1994. – 68 с.
15. Луцик Я.Т. Вимірювання температурні: теорія та практика / Я.Т. Луцик, О.П. Гук, О.І. Лах, Б.І. Стадник. – Львів: Бескід Біт, 2006. – 560 с.
16. Новицкий П.В. Электрические измерения неэлектрических величин: учебник. / А.М. Туричин, П.В. Новицкий, Е.С. Левшина. – М.: Энергоатомиздат, 1975. – 394 с.
17. 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.
18. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: підручник. / Є.С. Поліщук. – Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2000. – 360 с.
19. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Щарапова. - М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
20. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений. / С.А. Спектор. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
21. Шаповаленко О.Г. Основи електричних вимірювань. / О.Г. Шаповаленко, В.М. Бондар. – К.: Либідь, 2002. – 319 с.
22. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков: справочник. / Ю.Шульц. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.

