

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**О.А. Шпинковський
М.І. Шпинковська**

**Конспект лекцій
з дисципліни
«АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ»**

**для студентів денної форми навчання за спеціальністю: 152-
Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка**

Одеса ОНПУ - 2019

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**О.А. Шпинковський
М.І. Шпинковська**

**Конспект лекцій
з дисципліни
«АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ»**

**для студентів денної форми навчання за спеціальністю: 152-
Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка**

**Затверджено на засіданні кафедри
інформаційних систем ОНПУ
Протокол № 1 від 28.08.2018**

Одеса ОНПУ - 2019

Конспект лекцій “Аналогові вимірювальні прилади” для студентів денної форми навчання за спеціальністю: 152-Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка \
Укл.: О.А. Шпинковський, М.І. Шпинковська - Одеса: ОНПУ, 2019. - 125 с.

Зміст

ЛЕКЦІЯ 1. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ЗАСОБИ, ЯКІ ДЛЯ ЦЬОГО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ

Дисципліна «Аналогові вимірювальні прилади» викладається для студентів інституту промислових технологій, дизайну й менеджменту що навчаються за напрямом: 6.051001 – Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології. Вона викладається у 7 семестрі і розрахована на 54 години лекційних занять. Кожна лекція поточного конспекту розрахована на 4 години лекційних занять із можливістю скорочення обсягу викладання за потреб навчального процесу.

До початку вивчення матеріалу про вимірювання конкретних електричних величин доцільно ознайомитись: з низкою термінів, що є загальними для всіх вимірювань, з класифікацією електровимірювальних приладів, які використовуються на електроенергетичних підприємствах, а також при розподілі та споживанні електричної енергії. Необхідно також засвоїти сенс умовних позначень на шкалах електровимірювальних приладів, щоб запобігти користуванню приладами не за призначенням, тобто коли прилади можуть мати неприпустимі похибки і коли їх використання іноді шкідливе для приладів (наприклад, коли ці прилади будуть використані в умовах надто високої вологості або вібрації, рівень яких перевищує допустимі значення).

Доцільно також усвідомити значення окремих ділянок шкали електровимірювальних приладів та раціональність проведення вимірів на тих із них, де гарантовано найбільшу точність вимірювань.

1.1. Терміни та визначення вимірювальної техніки

Для електричних вимірювань застосовується низка термінів і понять, прийнятих за яких завгодно вимірів. До них належать визначення вимірювання фізичної величини, видів і методів вимірів, мір, еталонів, вимірювальних приладів та термінів, які доцільно зрозуміти ще до початку вивчення дисципліни "Основи електричних вимірювань" або окремих її частин, що передбачено програмами спеціальної технології та виробничого навчання.

Вимірювання — це сукупність дій, виконуваних за допомогою засобів вимірювання з метою знаходження числового значення вимірюваної величини у прийнятих одиницях вимірювання.

Засоби вимірювань — це технічні засоби для проведення експериментальної частини вимірювань, які мають нормовані метрологічні властивості. До засобів вимірювань відносять міри, вимірювальні прилади та перетворювачі, а також вимірювальні установки та системи, що складаються з цих засобів.

Фізична величина — це особливість чи властивість, загальна у якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів, однак кількісно відмінна для кожного з них. Наприклад, довжина, маса, електричний опір, електричний струм, електрична ємність тощо.

Міра — це засіб вимірювань, призначений для відтворювання фізичної величини певного розміру. Міри використовують як еталони, зразкові чи робочі засоби вимірювань.

Еталон — це міра, вимірювальний прилад або вимірювальна установка для відтворення, збереження або передавання одиниць будь-якої величини з найвищою можливою точністю.

Одиниця фізичної величини — це фізична величина, якій надано числове значення, що дорівнює одиниці.

Зразкова міра — це міра для перевірки і градування робочих мір і вимірювальних приладів.

Робоча міра — це міра, що її використовують для перевірки електровимірювальних приладів в умовах виробництва та в наукових дослідженнях.

Вимірювальні перетворювачі (датчики) — це засоби вимірювання, призначені перетворювати вимірювані фізичні величини у вихідні сигнали, зручні для подальшого перетворення, передання, оброблення чи реєстрації, але не здатні для безпосереднього сприймання та оцінки людиною. Їх застосовують для перетворення величин температури, тиску, рівня, швидкості та інших у функціонально зв'язані з ними величини електричної напруги чи струму.

Вимірювальні прилади — це засоби вимірювання, що забезпечують можливість безпосереднього відрахунку людиною (чи автоматичного запису) значень вимірюваних величин (наприклад, електричних напруг, струмів, потужностей, електричних опорів тощо).

Вимірювальна установка — це сукупність засобів вимірювань та допоміжних пристроїв, зібраних переважно в одному місці, призначена для одержання інформації, зручної для безпосереднього спостереження і оцінки людиною, або для автоматичної реєстрації.

Вимірювальна система — це сукупність засобів вимірювань та допоміжних пристроїв, розташованих у різних місцях та з'єднаних між собою засобами зв'язку, призначена для одержання вимірювальної інформації, здатної до сприйняття людиною, реєстрації та для використання у системах автоматичного управління.

Аналоговий вимірювальний прилад — це прилад, у якому вихідний сигнал, що сприймається людиною (наприклад, кут відхилення стрілки приладу), є фізичним аналогом вимірюваної величини. У цих приладів ця величина зчитується зі шкали приладу людиною чи реєструється на яко-

мусь носії інформації (наприклад, на градуйованій паперовій стрічці).

Цифровий вимірювальний прилад — це прилад, у якому вихідний сигнал, що сприймається людиною, є цифровим і зчитується у вигляді числа, що є на екрані чи на цифровому табло приладу, або реєструється у вигляді числа на якомусь носії інформації (наприклад, на неградуйованій паперовій стрічці).

Прямі вимірювання — це такі, за яких значення вимірюваної фізичної величини визначають безпосередньо з показів приладів.

Посередні вимірювання — це вимірювання, засновані на відомих залежностях між величиною, яку визначають, та безпосередньо вимірюваними величинами. Наприклад, визначення електричного опору за вимірюваними значеннями напруги і струму.

Метод вимірювання — це спосіб досягнення мети вимірювання, що складається з сукупності заходів і операцій, необхідних для практичного виконання вимірювання потрібної фізичної величини.

Точність вимірювань — це характеристика вимірювання, що показує ступінь наближеності його результату до істинного значення вимірюваної величини.

1.2. Класифікація аналогових електровимірювальних приладів

В енергетиці більшість вимірювань виконують за допомогою електровимірювальних приладів. Ними користуються навіть тоді, коли вимірювану фізичну величину не можна безпосередньо виміряти електровимірювальним приладом. У подібних випадках (а їх, наприклад, на електричній станції, чи не найбільше)

використовують вимірювальні перетворювачі неелектричних величин у електричну напругу чи струм, які вимірюють електричними приладами.

Досить зауважити, що для вимірювань власне електричних величин, що мають відношення до роботи одного генератора електричної станції, досить мати лише 12 ... 15 електричних приладів. А для контролю температури у багатьох його точках, для контролю роботи системи охолодження, системи змащення підшипників, величини вібрацій у багатьох точках необхідно десятки (а то й сотні) приладів, більшість з яких — електричні.

Саме тому в цьому підручнику, що призначений для підготовки робітників енергетичних спеціальностей, особлива увага приділена електровимірювальним приладам як найбільш розповсюдженим на електричних станціях, підстанціях, розподільчих пристроях та в енергетичних господарствах промислових підприємств. Щит управління потужним енергоблоком електричної станції з електричними приладами, встановленими на панелях щита та на пультах керування, показано на рис. 1.1.

Класифікація електровимірювальних приладів, тобто розподіл приладів на групи, що різняться між собою, здійснюється: • за точністю; • за виконанням для різних умов експлуатації; • за умовами впливу механічних факторів на прилади; • за захищеністю від дії зовнішніх магнітних і електричних полів; • за способом перетворення електричної енергії в механічну енергію переміщення рухомої частини вимірювального механізму; • за способом створення моменту протидії; • за конструкцією опори рухомої частини вимірювального механізму; • за видом відліку показів; • за положенням нульової позначки на шкалі; • за принципом дії перетворювача, застосованого у вимірювальному колі приладу; • за характером шкали.

- *За точністю* всі електровимірювальні прилади поділяються на класи.

- *За виконанням для різних кліматичних районів* Землі розрізняють прилади для районів з помірним кліматом;

помірним і холодним; вологим тропічним; сухим тропічним; сухим і вологим тропічним кліматом. Є прилади для морського і загальнокліматичного використання.

- *За умовами впливу механічних чинників* на прилади їх поділяють на: звичайні; звичайні з підвищеною міцністю; стійкі до механічного впливу (стійкі до трясіння, вібрації, нечутливі до вібрації та трясіння, уда-ромісні).

- *За видом захисту від дії зовнішніх магнітних і електричних полів* прилади поділяють на захищені від дії зовнішніх магнітних полів; захищені від дії зовнішніх електричних полів; встановлені на феромагнітних щитах; встановлені на немагнітних щитах; встановлені на будь-яких щитах.

- *За способом перетворення електричної енергії на механічну* прилади поділяють на: магнітоелектричні; електромагнітні; електродинамічні; індукційні; електростатичні; вібраційні; теплові.

- *За способом створення моменту протидії* прилади поділяють на: прилади з механічним моментом протидії, з магнітним моментом протидії і логометри (де момент протидії настає в результаті перетворення електричної енергії в механічну).

- *За конструкцією опори рухомої частини вимірювального механізму* прилади бувають такі: з рухомою частиною на кернах, з рухомою частиною на розтяжках або на підвісі.

- *За видом відліку показів* прилади бувають такі: зі стріл-ковим показчиком; зі світловим вказівником; з пристроєм, що записує показання; з пристроєм, що друкує показання; прилади з пластинами, що вібрують.

- *Залежно від положення нульової позначки на шкалі* прилади бувають такі: з

однобічною шкалою; з двобічною симетричною шкалою; з двобічною несиметричною шкалою; прилади зі шкалою, де нуль відсутній.

- За *характером шкали і положенням її робочої частини* прилади бувають: з рівномірною шкалою; з нерівномірною шкалою; з робочою частиною, що відповідає всій довжині шкали; з робочою частиною шкали, обмеженою в її початковій частині; з робочою частиною шкали, обмеженою в її кінцевій частині; з робочою частиною шкали, обмеженою з обох сторін.

- За *принципом дії перетворювача*, застосованого у вимірювальному колі приладу, прилади бувають: з випрямлячами струму (напівпровідниковими чи електромеханічними); електронні; термоелектричні (з неізольованими чи ізольованими термоперетворювачами); компенсаційні (з негативним зворотним зв'язком).

1.3. Позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Відліковим пристроєм електровимірювального приладу прямого відліку є шкала з нанесеними на ній позначками у вигляді коротких прямих відрізків, радіальних на дугових шкалах і перпендикулярних до напрямку руху покажчика (стрілки чи світлової плями з зображенням риски або стрілки) на прямолінійних шкалах. Відстань між сусідніми позначками шкали називається **довжиною поділки шкали**.

Величина відношення приросту переміщення покажчика (виражена у числі поділок шкали) до величини приросту вимірюваної приладом фізичної величини (вираженої в одиницях, позначених на цій шкалі), що викликала це переміщення, називається **чутливістю приладу**. Наприклад, поділок на один вольт — для вольтметра, поділок на один ампер — для амперметра, поділок на один ват — для ватметра і т.д. Величина, обернена до чутливості, називається **ціною поділки**. Наприклад, вольт на одну поділку — для вольтметрів, ампер на одну поділку — для амперметрів, ват на одну поділку — для ватметрів тощо.

Якщо довжина всіх поділок однакова або майже однакова, як і ціна кожної з цих поділок, то шкала називається *рівномірною*. Якщо не всі поділки шкали однакові, чи ціна бодай однієї з них відмінна від ціни інших поділок, то шкала називається *нерівномірною*.

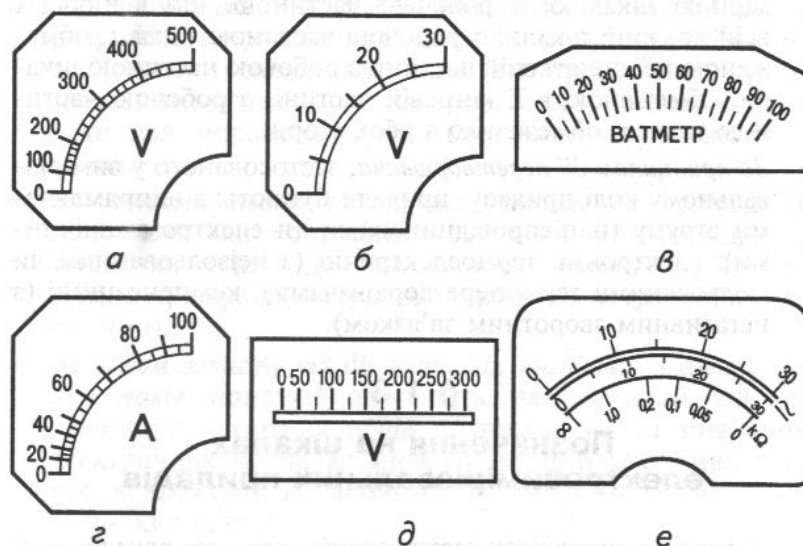


Рис. 1.2. Шкали електровимірювальних приладів

Шкали низки електровимірювальних приладів зображено на рис. 1.2: *а)* стаціонарного електромагнітного вольтметра (нерівномірна); *б)* стаціонарного магнітоелектричного вольтметра постійного струму (рівномірна); *в)* переносного електродинамічного багатограничного ватметра (рівномірна); *г)* стаціонарного електромагнітного амперметра змінного струму, призначеного для роботи з вимірювальним трансформатором струму (нерівномірна); *д)* переносного електростатичного вольтметра (нерівномірна); *е)* переносного багатфункціонального приладу — вольт-ампер-омметра (рівномірна для постійних напруг і струмів, нерівномірна для змінних напруг і струмів та для опорів).

Позначення на шкалах приладів несуть інформацію про призначення приладу, одиниці вимірювання, на які він розрахований, рід струму, клас точності (у відсотках від нормованого значення, частіш за все — від вимірюваної ним величини, що відповідає останній цифровій позначці шкали приладу), систему вимірювального механізму, застосованого у даному приладі; нормальне положення приладу; величину випробної напруги електричної міцності ізоляції струмопровідних частин приладу відносно його корпусу; величину опору електричних кіл переносних приладів (а для послідовних кіл — і величину їхніх індуктивностей); про наявність власного захисту від дії сторонніх магнітних чи електричних полів; захист від впливу зовнішнього оточення; про необхідність попереднього ознайомлення з додатковими вказівками, що є у паспорті чи описі приладу; відомості про підприємство, де цей прилад виготовлено, та рік його виготовлення.





Написи і позначення на шкалах електровимірювальних приладів та пояснення до них наведені у табл. 1.1. Звичайно, для прикладу наведено лише деякі позначення. На шкалах окремих приладів роблять написи, вкрай необхідні лише користувачеві даним приладом. Наприклад, на шкалах стаціонарних амперметрів, ватметрів, фазометрів і на табличках лічильників роблять написи про необхідні додаткові пристрої (шунти, трансформатори струму), з якими ці прилади необхідно застосовувати; на шкалах вольтметрів, ватметрів, фазометрів і табличках лічильників можуть бути відомості про необхідні трансформатори напруги чи додаткові опори, з якими необхідно застосовувати ці прилади. На шкалах малокосинусних ватметрів обов'язково має бути позначено номінальну величину косинуса кута зсуву фаз, бо, незважаючи на цей показник, можна суттєво перевантажити прилад по обертовому моменту, не перевантажуючи його ні струмом, ані напругою.

Таблиця 1.1.


Написи й позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Символ на шкалі приладу	Значення символу	Символ на шкалі приладу	Значення символу
A	Ампер		Магнітоелектрична система
V	Вольт		Магнітоелектрична система з рухомим магнітом
W	Ват		Електромагнітна система
Hz	Герц		Електродинамічна система
Ω	Ом		Феродинамічна система
T	Тесла		Індукційна система
—	Постійний струм		Теплова система з ниткою, що нагрівається
~	Змінний однофазний струм		Електростатична система
\approx	Змінний трифазний струм		Вібраційна система
∇	Змінний трифазний струм з асиметричним навантаженням		Термоелектрична система з неізовованою термопарою
	Небезпека доторкання до приладу		Термоелектрична система з ізовованою термопарою
☆	Випробна напруга ізовованості 500 В		Захист від зовнішніх магнітних полів
☆	Випробна напруга ізовованості 2 кВ		Захист від зовнішніх електричних полів

Продовження табл. 1.1.

Символ на шкалі приладу	Значення символу	Символ на шкалі приладу	Значення символу
	Вертикальне		Клас точності, якщо нормуюче значення дорівнює даному показанню приладу
	Горизонтальне	ast	Астатичний захист приладу від зовнішніх магнітних полів
	Під нахилом (60°)	Fe5	Встановлення на щиті зі сталі 5 мм завтовшки
0,05 0,1 0,2 0,5 1,0 1,5 2,5 4,0 5,0	Клас точності приладу у відсотках від нормованого значення	Fe	Встановлення на щиті зі сталі будь-якої товщини
1,5	Клас точності, якщо нормувальне значення дорівнює верхній границі діапазону вимірювань	NFe	Встановлення на несталевому щиті будь-якої товщини
	Клас точності, якщо нормувальне значення дорівнює довжині шкали чи її частини, що відповідає діапазону вимірювань	Fe.NFe	Встановлення на будь-якому щиті будь-якої товщини

Закінчення табл. 1.1.

Символ на шкалі приладу	Значення символу	Символ на шкалі приладу	Значення символу
A	Для закритих сухих опалюваних приміщень	T	Для сухого і вологого тропічного клімату
B	Для закритих сухих неопалюваних приміщень		Необхідність ознайомлення з додатковими вказівками, наведеними в паспорті чи описі приладу
B	Для польових і морських умов, для пересувних установок	0,02 Ом 0,005 Гн	Номинальний активний опір й індуктивність послідовного кола переносних приладів

На шкалах позначають величину номінальної частоти, на яку розраховано прилад (за винятком частоти 50 Гц, яку не позначають числом, якщо на шкалі вже є позначка, що прилад придатний до вимірювань на змінному струмі чи на постійному та змінному).

Якщо ж прилад використовують не тільки за його номінальної частоти, а й у дещо розширеному діапазоні частот (де для нього буде допустима більша похибка, ніж та, що вказана класом приладу), то на шкалі цей розширений діапазон позначають трьома крапками, а номінальну частоту підкреслюють (наприклад: 50...500 Гц). Тобто прилад призначено для роботи на частоті 50 Гц, але ним можна користуватись за частот до 500 Гц, враховуючи, що, працюючи в розширеному діапазоні частот, прилад може давати додаткову похибку. Про величину цієї похибки можна дізнатися з опису приладу. Звичайно ця додаткова похибка не перевищує величини, що позначена класом точності приладу.

На шкалах приладів з нерівномірним характером шкали, безпосередньо біля кінців позначок, є крапки, що обмежують робочу частину шкали, тобто ту, якою варто користуватись, бо там гарантована точність вимірів.

Основними позначками на шкалах є ті, що відповідають певним значенням вимірюваної величини при знаходженні над ними покажчика приладу (кінця стрілки), чи при проектуванні на них лінії, що є на світловій плямі світлового покажчика. Ці позначки у більшості стаціонарних приладів мають різну довжину: найбільшої довжини — цифровані, тобто для них позначено цифри, що відповідають конкретним значенням вимірюваної приладом величини в одиницях, назву яких позначено на шкалі.

У переносних приладах, які виконують із двома або більше верхніми границями вимірювань, число поділок шкали роблять зручним для вимірювань у разі вмикання приладу на будь-яку з цих границь. При цьому найдовші позначки шкали цифрують за десятковою системою числення.

Зазначимо, що точні електровимірювальні прилади градуують через п'ять поділок шкали, а проміжні позначки наносять шкалопишущими машинами, які механічно поділяють відстань між градуйованими позначками за законом, зумовленим характером шкали. На проміжних позначках прилади виробники не повіряють, тому при вимірюваннях на цих позначках похибка може бути дещо більша за величину, що передбачена класом приладу, особливо коли на найближчій цифровій позначці похибка приладу є на межі допустимої величини.

Контрольні запитання:

1. Що таке міра?
2. Що таке еталон?
3. Чим відрізняється аналоговий вимірювальний прилад від цифрового?
4. Що називають похибкою вимірювання?
5. Чим відрізняються прямі вимірювання від посередніх?
6. Які бувають похибки вимірювань?
7. Що таке основна похибка засобу вимірювання?
8. Які засоби вимірювань використовують в енергетиці?
9. Як вимірюють неелектричну фізичну величину за допомогою електровимірювального приладу?
10. Назвіть основні вузли, з яких складається електровимірювальний прилад.
11. Назвіть типи вимірювальних механізмів, які використовують у електровимірювальних приладах, і поясніть принцип дії кожного з них.
12. Чому у більшості дво- й багатограничних переносних приладів на

шкалі відсутнє позначення вимірюваної величини.

13. Що позначають крапками біля позначок на шкалах електровимірювальних приладів?
14. Чому при користуванні електровимірювальними приладами бажано робити виміри на позначках, що знаходяться ближче до кінцевої частини

шкали?

ЛЕКЦІЯ 2. ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ

Похибки при вимірюваннях неминучі й залежать як від самого засобу вимірювання, так і від спостерігача. Необхідно лише пильнувати, щоб величини цих похибок не були занадто великими, коли втрачається сенс вимірювання. Особливо значні похибки можуть з'являтися за посередніх вимірювань, коли загальна похибка може скластися з похибок декількох засобів вимірювання, та ще й із похибки при розрахунках. Саме тому необхідно знати, які можуть бути похибки, від чого вони залежать, яким чином їх можна зменшувати, що таке класи точності засобів вимірювань та яким чином треба проводити перевірку цих засобів, щоб уникнути появи недопустимих похибок при використанні приладів.

Необхідно пам'ятати, що в реальних умовах використання засобів вимірювання величини похибок можуть перевищувати значення, обмежені класом точності цих засобів, через дію таких впливаючих чинників: зовнішньої температури, сторонніх магнітних та електричних полів, вібрації в місцях, де встановлено засоби вимірювання та ін. Водночас засоби вимірювання не повинні підпадати під дію кількох впливаючих чинників.

2.1. Класифікація похибок вимірювань

Виходячи з того, що похибкою вимірювання вважають відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини, встановимо, що за характером проявлення похибок їх поділяють на систематичні й випадкові.

Систематичні похибки — це ті, що лишаються постійними чи змінюються за відомими законами.

Випадкові похибки — це ті, що змінюються випадково, за законами, що невідомі спостерігачеві.

До систематичних похибок відносять:

- похибки методу вимірювання;
- інструментальні похибки засобів вимірювання;
- особисті похибки спостерігача;
- похибки положення засобів вимірювання.

Похибки методу вимірювання — це похибки розрахунку, що виявляються тоді, коли шукають величину, яку визначають розрахунком з показів кількох засобів вимірювання, якщо розрахунок приблизний і зроблений з низкою припущень. Складовою цієї похибки може стати вплив наявності опорів у електричних колах засобу вимірювання на стан вимірювального кола.

Інструментальна похибка — це похибка засобу (чи засобів) вимірювання, зумовлена недоліками схеми, конструкції, технології виготовлення, умовами експлуатації.

Особисті похибки — це похибки, пов'язані з особистістю спостерігача, з рівнем його кваліфікації, з вадами його зору тощо.

Похибка положення засобу вимірювання, як складова систематичної, для стаціонарних приладів може бути зумовлена неточним встановленням засобу вимірювання відносно положення, що вказане на шкалі цього засобу, або встановленням на панелі, товщина якої не відповідає тій, що рекомендована.

Слід зазначити, що й особисті похибки, й похибки положення слід частково віднести й до складових випадкових похибок, особливо при використанні переносних засобів вимірювання, встановлення яких кожного разу дещо

відрізняється від попереднього.

Систематичні похибки, в усякому разі — ті їх складові, що заздалегідь відомі (від неточного градування шкали або неточності підгонки опорів тощо), можуть бути враховані, якщо заздалегідь визначити поправки до показів засобів виміру. Ці поправки визначають шляхом порівняння показів робочого засобу вимірювання з показами зразкового засобу для кожної з цифрованих позначок шкали робочого засобу. Для проміжних позначок поправки визначають інтерполюванням поправок, визначених для найближчих цифрованих позначок.

Залежно від способу вираження похибки бувають абсолютними чи відносними.

Абсолютна похибка — це різниця між вимірним та істинним значенням вимірюваної величини, виражена в одиницях цієї величини.

Відносна похибка — це різниця між вимірним та істинним значенням вимірюваної величини, виражена в долях чи відсотках її істинного значення. Оскільки істинне значення вимірюваної величини нам невідоме, а величина, що виміряна при справному стані засобу вимірювання, дещо відрізняється від істинного, то відносна похибка може бути виражена у частках чи відсотках від значення вимірюваної величини.

У більшості вимірювань спостерігача цікавить відносна похибка, бо саме за її величиною можна скласти уявлення про точність вимірювання.

Для того щоб скласти уяву про точність вимірювання на конкретному засобі виміру, користуються поняттям про зведену похибку.

Зведена похибка — це відношення абсолютної похибки до нормуючого значення вимірюваної величини. За нормуюче значення частіше за все приймають верхню границю вимірювання даного вимірювального засобу, наприклад значення вимірюваної величини, що відповідає найбільшій цифрованій позначці, розташованій у кінці шкали.

Залежно від умов експлуатації для кожного вимірювального засобу розрізняють основну і додаткові похибки.

Основна похибка — це похибка засобу вимірювання, яку він має за нормальних умов експлуатації, тобто при значенні температури довкілля, вологості повітря, атмосферного тиску та інших умовах, які для даного засобу вимірювання вважаються нормальними, згідно з його описом та вимогами державних стандартів. У справного засобу вимірювання ця похибка може бути різною при різних значеннях вимірюваної величини, але зведена величина цієї похибки не повинна бути більшою тієї величини, яка передбачена класом точності даного засобу вимірювання.

Додаткова похибка — це величина зміни показів засобу вимірювання, яка виникає в разі відхилення бодай однієї з умов його експлуатації від її номінального значення або виникає в разі появи зовнішніх чинників, що впливають на роботу засобу вимірювання.

Додаткових похибок у засобу вимірювання може бути багато — за числом чинників, що впливають на його покази.

Додаткові похибки від дії різних впливів, накладаючись на основну похибку засобу вимірювання, через надмірну величину реальної підсумкової похибки можуть звести нанівець результати вимірювання.

До похибок, що трапляються при вимірюванні, відносять також промахи. *Промахи* — це похибки значної величини, що виділяються порівняно з рівнем звичайних випадкових похибок. Промахи виникають внаслідок грубих помилок спостерігача чи неправильного запису показів засобу вимірювання. Їх досить легко виявити, якщо є можливість провести декілька вимірювань контрольованої величини, якщо ця величина з часом майже не змінюється. Це можливо у випадках, коли робота з засобом вимірювання проводиться в умовах лабораторії, де, при бажанні, є

можливість повторювати вимірювання декілька разів, наприклад при перевірці робочих приладів за зразковими. Якщо при повторних вимірюваннях підозріла вимірювана величина не повторюється, то її не враховують.

Якщо сумнівний показ будь-якого приладу, що контролює технологічний процес, було помічено спостерігачем, то, звичайно, ніяке повторення якоїсь частини цього процесу заради перевірки правильності вимірювань неможливе. І до сумнівного вимірювання треба ставитись уважніше, тим більше, що в енергетичних установках можуть реально відбуватися короткотривалі процеси (наприклад значне збільшення величини струму), які потім не повторюються. Це може статися, наприклад, у мить короткочасного збільшення струму (чи потужності) в лінії електропередачі при аварійному короткому замиканні у якогось із споживачів, з наступним відмиканням цього споживача його власним автоматичним вимикачем. Тому до випадкової зміни показу засобу вимірювання треба ставитися досить уважно й спробувати знайти пояснення появи такого виміру. Наприклад, після короткочасного збільшення струму одразу треба звернути увагу на реєструючий вольтметр, де на паперовій стрічці (якщо таке підвищення струму все ж таки було) обов'язково буде зареєстровано короткочасне, хоч і невелике, зниження напруги. Якщо такого зниження не було, то можна вважати, що не було й збільшення струму, й тоді це вимірювання струму можна вважати промахом та не зважати на нього.

Варіація показів вимірювального приладу — це різниця його показів при одному і тому ж самому значенні вимірюваної величини, що виникає, якщо одного разу вимірювання було виконано за збільшення вимірюваної величини до певного її значення, а іншого — за зменшення вимірюваної величини від більшого до того ж певного значення.

У лабораторних умовах величину варіації визначають як різницю показів зразкового приладу, ввімкнутого поряд із тим, для якого визначають варіацію. Ця різниця визначається на певній цифровій позначці шкали, якщо показчик приладу, що контролюється, встановлюють на певну позначку його шкали спочатку при плавному збільшенні вимірюваної величини від нуля, а потім при плавному її зменшенні від найбільшої величини, вимірюваної приладом. При цьому бажано запобігти появі власної варіації зразкового приладу.

У приладів з рухомою частиною, що спирається на керни, варіація здебільшого з'являється внаслідок наявності тертя між кернами та підп'ятниками, хоча у приладів електромагнітної й феродинамічної систем, які працюють на постійному струмі, варіація може бути й через наявність гістерезису, тобто різниці ступенів намагнічування рухомого осердя у електромагнітних і сталевих магнітопроводу — у феромагнітних приладах.

2.2. Оцінка похибки при посередніх вимірюваннях

При посередніх вимірюваннях фізична величина, яку необхідно визначити, розраховується на основі відомої функціональної залежності між нею та кількома іншими фізичними величинами, кількісно визначеними шляхом прямих вимірювань. Так, величину електричного опору будь-якого електричного кола визначають як частку ділення величини напруги, прикладеної до нього, що одержана за показами вольтметра, на величину струму, який проходить по цьому колу, що одержано за показами амперметра.

Звичайно, можлива величина похибки при посередніх вимірюваннях буде відрізнятися від величини можливої похибки кожного із застосованих приладів.

Гранична можлива абсолютна похибка визначення якоїсь величини, якщо її знаходять як суму або різницю двох виміряних величин, дорівнює сумі можливих

граничних абсолютних похибок складових вимірюваних величин.

Гранична можлива відносна похибка визначення якоїсь величини, якщо вона визначається як добуток від множення двох або кількох вимірюваних величин, дорівнює сумі граничних можливих відносних похибок вимірювання цих величин.

Гранична можлива відносна похибка визначення якоїсь величини, якщо ця величина є якимось ступенем вимірюваної, дорівнює граничній можливій відносній похибці вимірювання, помноженій на показник ступеня.

Гранична можлива відносна похибка визначення якоїсь величини, якщо вона визначається коренем якогось ступеня з вимірюваної величини, дорівнює граничній можливій відносній похибці вимірювання, поділеній на показник кореня.

Використовуючи прилади вищих класів точності або поправки до показів приладів, можна досягти зменшення кінцевої похибки при посередніх вимірах.

Завжди необхідно пам'ятати, що розраховані величини граничних похибок є найбільшими, які тільки можна одержати за посередніх вимірів. Наявність у вимірювальних приладах похибок, менших за гранично допустимі, та похибок з різними знаками можуть суттєво зменшити кінцеву похибку посередніх вимірювань. Посередні вимірювання будуть точнішими, якщо застосовувати прилади вищих класів точності, працювати на рівні вимірюваної величини не меншій за 90...75 % від верхньої границі вимірювань приладів і вводити поправки до показів приладів, заздалегідь визначених за зразковими приладами чи на точних вимірювальних установках.

2.3. Класи точності засобів вимірювання

Клас точності засобу вимірювання — це узагальнена характеристика, що є показником встановлених для нього Державними стандартами границь основної та додаткових похибок.

За наявності в засобі вимірювання кількох діапазонів вимірів, для кожного з них може бути встановлено свій клас точності. Те саме можна сказати й про засоби вимірювання, що здатні вимірювати декілька фізичних величин, де класи точності вимірювання різних величин можуть відрізнятися один від одного. Наприклад, багатодіапазонні вольтметри можуть мати вищий клас точності при вимірюваннях на діапазонах, що відповідають більшим напругам (300, 150 та 75 В), і нижчий — при вимірюваннях на діапазонах малих напруг (наприклад, 30 та 15 В).

Засоби вимірювання, що здатні працювати як на постійному, так і на змінному струмах, можуть мати різні класи точності для різних родів струму.

Для електровимірювальних приладів класи точності можуть мати значення: 0, 05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0.

Для допоміжних частин (пристроїв), які розширюють можливості вимірювань цими приладами, класи точності можуть бути: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0. До таких частин і пристроїв відносять калібровані шунти, додаткові опори, подільники напруги.

Позначена на приладі величина класу точності обмежує найбільшу допустиму величину основної похибки приладу, зведену до нормувальної величини. **Основна похибка** — це похибка, одержана при вимірюваннях за нормальних умов експлуатації приладу й за відсутності зовнішніх чинників, які впливали б на його роботу.

Основна похибка електровимірювальних приладів визначається: для приладів з односторонньою шкалою — у відсотках від кінцевого значення робочої частини шкали;

для приладів із двосторонньою шкалою — у відсотках від суми кінцевих

значень робочої частини шкали; для приладів із безнульовою шкалою — у відсотках від різниці кінцевого і початкового значень робочої частини шкали;

для приладів із суттєво нерівномірними шкалами — у відсотках від довжини робочої частини шкали.

Основна похибка зразкових катушок опору, шунтів і додаткових опорів визначається у відсотках від їхніх номінальних опорів.

Основна похибка подільників напруги визначається у відсотках від їхніх номінальних коефіцієнтів поділу.

Основна похибка зразкових катушок індуктивності чи взаємодуктивності визначається у відсотках відповідно від номінальної величини індуктивності чи взаємодуктивності.

Основна похибка зразкових конденсаторів визначається у відсотках від номінальної величини їхньої ємності.

Величини класу точності позначаються на шкалах електровимірювальних приладів на табличках, які є на зразкових мірах та в технічних описах цих та інших засобів вимірювання.

Похибки засобів вимірювання під час їх реальної експлуатації можуть суттєво перевищувати ті значення, які обмежуються величиною класу точності. Це пояснюється можливістю складання додаткових похибок з основною похибкою і наявністю варіації.

2.4. Повірка засобів вимірювання

Згідно з Державними стандартами розрізняють чотири види повірок засобів вимірювання:

- первинну; • періодичну; • позачергову; • інспекційну.

Первинна повірка проводиться перед випуском засобу вимірювання з виробництва чи після ремонту.

Періодична повірка проводиться в період експлуатації чи зберіганні засобів вимірювання — через певний термін.

Позачергова повірка проводиться в період експлуатації та зберігання засобів вимірювань, якщо виникає необхідність впевнитись у справності цих засобів (перед встановленням на місце роботи, у разі сумніву в точності показу засобів, при пошкодженні пломби тощо).

Інспекційна повірка може проводитися для підтвердження відповідності будь-якого засобу вимірювання вимогам технічної документації на цей засіб у ході метрологічної ревізії.

Значна частина засобів вимірювання підлягає відомчій повірці, яку виконують органи відомчої метрологічної служби, що мають дозвіл від державних метрологічних органів.

Зразкові засоби вимірювання, якими користуються при відомчих повірках засобів вимірювань, що застосовуються на виробництві, підлягають обов'язковій *державній повірці*.

Відомчу повірку проводять за показами зразкових засобів вимірювання. Клас точності зразкового засобу вимірювання має бути у 4...5 разів вищий за клас точності того засобу, що повіряється. Наприклад, стаціонарний електровимірювальний прилад класу 2,5 слід повірять за зразковим переносним приладом класу 0,5. Стаціонарні прилади класу 1,5 чи 1,0 слід повірять переносними приладами класу 0,2 і т.д.

В умовах енергетичного підприємства повірки електровимірювальних приладів доцільно проводити у метро-логічній лабораторії на універсальній вимірювальній установці, де є роздільні кола живлення і регулювання струму та напруги.

Контрольні запитання:

1. Які похибки вимірювань називають систематичними?
2. Які похибки вимірювань називають випадковими?
3. Як визначити відносну похибку, знаючи абсолютну похибку вимірювання?
4. Яку похибку засобу вимірювання називають основною?
5. Що таке додаткова похибка?
6. Назвіть фактори, що впливають на додаткові похибки вимірювальних приладів.
7. У якому співвідношенні має бути основна похибка вимірювального приладу з його класом точності?
8. Що спричиняє варіацію показів електровимірювальних приладів?
9. Як у лабораторних умовах можна визначити величину варіації показів електровимірювального приладу?

10. Назвіть способи зменшення похибок при посередніх вимірах.
11. Наведіть приклади посередніх вимірів електричних величин.
12. Що таке клас точності вимірювального приладу і які бувають класи точності електровимірювальних приладів?
13. Як можна визначити поправки до показів електровимірювального приладу?

ЛЕКЦІЯ 3 МІРИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

В умовах сучасного підприємства енергетичного профілю, де для ефективного контролю за технологічним процесом виробництва електричної енергії використовуються тисячі вимірювальних приладів, є окремі виробничі підрозділи, які забезпечують виявлення несправності, ремонт, а також післяремонтну перевірку цих приладів. У таких підрозділах обов'язково є вимірювальні установки, на яких контролюють вимірювальні прилади як після ремонту, так і профілактично, через певний час. Це дає змогу користуватися тільки тими приладами, що забезпечують потрібну точність вимірювань. Найважливішими елементами цих вимірювальних установок є міри електричних величин: електрорушійної сили, опору, індуктивності, взаєміндуктивності та ємності.

Для того щоб свідомо користуватися мірами, необхідно знати їх будову, умови експлуатації та ретельно виконувати умови їх зберігання та періодичної перевірки органами Держстандарту.

3.1. Міри електрорушійної сили

Мірою електрорушійної сили (ЕРС) постійного струму є нормальний елемент, що має точно відому ЕРС. Нормальні елементи виробляють двох типів — насичені й не-насичені (залежно від стану залитого в нього електроліту — розчину сульфату кадмію).

Будову насиченого нормального елемента показано на рис. 3.1.

Елемент складається з Н-подібної посудини зі влитою в неї двома виводами, що виконані з платинових дріт. Ці виводи контактують з електродами елемента. Позитивним електродом у цьому елементі є живе срібло 1, негативним — амальгама кадмію (розчин кадмію в живому сріблі).

Вище позитивного електрода міститься шар деполяризатора 2 (суміш сірчаноокислого кадмію й сірчаноокислого закису живого срібла). Електролітом 4 у цьому елементі є розчин сульфату кадмію у воді, кристали 5 якого осідають на деполяризатор 2 і на негативний електрод 7. У скляній посудині 3 є звуження 6, призначені для утруднення перемішування шарів-компонентів елемента при випадкових нахилах. ЕРС такого елемента при температурі 20 °С перебуває в межах 1,0185...1,0187 В і надзвичайно незначно змінюється з плином часу (десь не більше як 50...100 мкВ протягом року), але залежить від температури. Ця залежність відома для кожного елемента і не перевищує 42 мкВ на кожний градус у межах температури від 20 до 40 °С. Ці елементи мають досить великий власний внутрішній опір (500...1000 Ом) і надзвичайно чутливі до навантаження, їх струм ні за яких обставин не повинен перевищувати 1 мкА протягом однієї хвилини. Саме через це їхню ЕРС не можна контролювати вольтметрами (винятком можуть бути хіба що електронні вольтметри, які мають величину вхідного опору більшу ніж 10^6 Ом при границі виміру напруги 1...3 В).

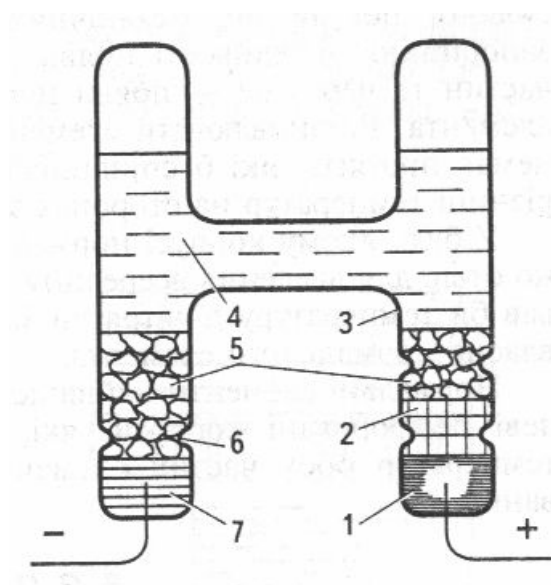


Рис. 3.1

Будова насиченого нормального елемента

Насичений нормальний елемент є надзвичайно чутливим до нахилів, струсів та вібрацій. В описах деяких із цих елементів, наприклад, обумовлено, що їх транспортування треба виконувати, тримаючи елемент на руках. Після будь-якого переміщення такого елемента він має відстоюватися на новому місці майже протягом доби.

Ненасичені нормальні елементи дещо відрізняються від *насичених*. У них електроліт при температурах, вищих за 4 °С, — ненасичений, із нього не випадають кристали. Між електролітом і деполяризатором, з одного боку, і між електролітом і кадмієвою амальгамою — з іншого, встановлено тонкі коркові пористі перегородки, які перешкоджають перемішуванню шарів елемента при нахилах чи при транспортуванні. Ці (ненасичені) елементи мають трохи більшу ЕРС (при 20 °С 1,0185...1,0195 В), менший внутрішній опір (десь близько 300 Ом), допускають більший струм (до 10 мкА) і мають значно менший температурний коефіцієнт ЕРС (до 3 мкВ/°С).

Ненасичені нормальні елементи широко використовують як *еталони ЕРС* для калібрування багатьох точних переносних електронних приладів (у тому числі й цифрових), тоді як насичені елементи використовують лише у стаціонарних засобах вимірювання.

Нормальний елемент розміщують у захисному корпусі, найчастіше пластмасовому. Він необхідний як для захисту скляної посуду від механічних пошкоджень, так і для запобігання можливості появи різниці температур обох її частин та через це — появи неконтрольованої зміни ЕРС елемента. Встановлювати елемент необхідно в затишку, де немає протягів, які б спричиняли появу хоча б незначної різниці температур на сторонах захисного корпусу.

У будь-якому корпусі нормального елемента передбачено отвір для введення всередину термометра, що контролював би температуру повітря чи масла в місці розташування власне нормального елемента.

Нормальні елементи найвищого класу вміщують в металеві перфоровані корпуси, які, для забезпечення рівних температур обох частин елемента, занурюють

у масляну ванну.

3.2. Міри електричного опору

Як міри електричного опору використовують *зразкові котушки опору*, які виконують на основі резисторів з манганінового дроту чи стрічки.

Манганін — це сплав міді, марганцю й нікелю з домішкою алюмінію та заліза. Він має досить високий питомий електричний опір ($0,47...0,48 \text{ Ом} \cdot \text{ммУм}$), зовсім малий температурний коефіцієнт опору і малу термо-ЕРС у з'єднанні з міддю (1 мкВ/К).

Високий питомий опір дає можливість виконати котушку з малою довжиною намотаного проводу. Малий температурний коефіцієнт опору забезпечує незначну зміну опору при зміні температури в місці вимірювань і незначну за- і лежність опору котушки від величини струму.

Незначна термо-ЕРС у з'єднанні з міддю дає можливість вмикати котушку в які завгодно вимірювальні схеми, де з'єднання зроблено звичайним мідним дротом, без побоювання того, що у місцях з'єднання під дією чи то місцевої температури довкілля, чи то нагріву їх струмом з'являться неконтрольовані термо-ЕРС, які призведуть до появи похибки у вимірюваннях.

Для порівняння зауважимо, що питомий електричний опір манганіну у 25 разів більший за питомий опір міді, температурний коефіцієнт електричного опору манганіну майже у 140 разів менший, ніж у міді, термо-ЕРС у з'єднанні манганін—мідь десь у 40...50 разів менша, ніж у з'єднанні міді з константаном.

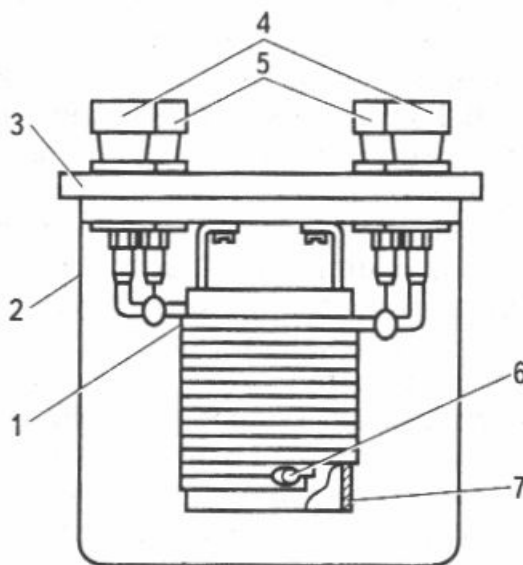


Рис. 3.2

Зразкова котушка опору

Будову *зразкової котушки опору* показано на рис. 3.2, Ізольований манганіновий провід чи стрічку 7 намотано на металевий чи керамічний каркас 7, жорстко закріплений на ізоляційній основі 3, до якої також прикріплено захисний металевий кожух 2, два контактні затискачі 4 для вмикання котушки в коло струму і два

контактні затискачі 5 для приєднання котушки до кола виміру напруги. Наявність у котушки чотирьох затискачів необхідна для вилучення з кола вимірювання напруги контактної опору затискачів, по якому протікає робочий струм котушки. Номінальним опором котушки вважається той, що знаходиться між місцями приєднання затискачів 5 до проводу, який намотано на каркас 7.

У більшості зразкових котушок ізолюваний провід 1 намотано на каркас у дві паралельні гілки (біфілярно), причому початкові частини цих гілок приєднано до затискачів 4 і 5, а кінці 6 з'єднані разом. Переносючи точки лютування кінцевої частини вказаних гілок, підганяють опір зразкової котушки до його номінального значення. Котушки номінального опору від 0,001 до 100 000 Ом виробляють з класами точності 0,01 та 0,02.

Клас точності котушки опору відповідає допустимому відхиленню (у відсотках) дійсного значення опору котушки від номінального значення її опору, за винятком котушок з класами точності 0,0005...0,01, для яких клас точності показує найбільшу величину зміни опору котушки за один рік, виражену у відсотках від номінального значення опору.

Всі зразкові котушки опору придатні до вмикання в кола постійного струму, але не всі вони придатні до роботи в колах змінного струму, де повний опір буде відрізнятися від їхнього активного опору через вплив залишкових індуктивностей і ємностей. Досвід показує, що такі котушки за їхніх малих номінальних опорів усе ж таки мають деяку залишкову індуктивність, яка при вмиканні котушок у кола змінного струму робить їхній повний опір більшим за номінальний. Стосовно котушок з великими номінальними опорами, то за наявності біфілярних обмоток, завдяки міжвитковим ємностям, активний опір котушки дещо шунтується цими ємностями, через що повний опір таких котушок дещо менший за їхній номінальний опір.

Одним із способів зменшення впливу міжвиткових ємностей на опір котушки є виконання її обмотки у два шари, з різним напрямом намотування кожного з цих шарів та паралельним вмиканням провідників, якими намотано ці шари.

У наш час вже вироблено серію зразкових котушок опору, здатних у своєму класі точності працювати у вимірних колах як постійного, так і змінного струму. Але найбільші граничні частоти, на яких можна використовувати ці котушки, як правило, різні для різних номінальних опорів.

Зразкові котушки опору виробляють лише на обмежені величини номінальних опорів. Причому кожна наступна величина номінального опору відрізняється від попередньої в 10 разів.

За практичного використання зразкових котушок слід мати на увазі, що їх не слід перевантажувати струмом понад допустимий, бо навіть при номінальному струмі котушки манганіновий провід, з якого виготовлено її струмопровідну частину, може нагрітися до температури, що перевищує 20 °С, в результаті чого величина опору, незважаючи на незначний температурний коефіцієнт опору манганінового дроту, може дещо змінитися й бути відмінною від тієї, яка була за малих струмів, близьких, наприклад, до 0,1 від номінального.

Для котушок, які розміщені у масляній ванні, зміна опору завдяки нагріву манганінового проводу номінальним струмом значно менша, що пояснюється незначною температурою нагріву цього проводу, зануреного в масло, де умови охолодження кращі, ніж за повітряного охолодження.

На енергетичних підприємствах у схемах перевірки електровимірювальних приладів потенціометрами найчастіше використовують зразкові котушки опору

класів 0,02 чи 0,05.

У зв'язку з тим, що зразкові котушки опору виготовляють у обмеженій кількості типорозмірів за величиною опору, а в процесі вимірювань треба мати можливість користуватися каліброваними опором практично якої завгодно величини (звичайно, все ж у якомусь обмеженому діапазоні величин опорів), користуються *магазинами опорів*. Такі магазини являють собою набір резисторів, зібраних у єдиному корпусі й підігнаних з необхідною точністю, і перемикальних пристроїв (штепсельних, важільних або з багатьма затискачами).

Будову *штепсельного магазину опорів* показано на рис. 3.3. Величина опору такого магазину, що є між двома крайніми затискачами 2 і 5, залежить від того, які зі штепселів 4 витягнуто з гнізд створеними контактними колодками 3, до яких прилютовані вихідні кінці кожного з резисторів. Такий магазин, що складається всього з дванадцяти резисторів 6, дає можливість одержати між його затискачами 2 і 5 величини опорів від нуля (коли всі штепселі встановлено у гнізда між контактними колодками) до 1110 Ом (коли всі штепселі витягнуто з цих гнізд), через один Ом. При таких вийнятих штепселях, як показано на рисунку, величина опору магазину становить 457 Ом. Поряд із контактними колодками на панелі 7 магазину є отвори, куди вставляють витягнуті штепселі. Ці отвори зроблено для збереження штепселів та запобігання їм втрати.

Крім магазину, показаного на рис. 3.3, можуть бути магазини іншої схеми, так звані декадні, де опорів дещо більше.

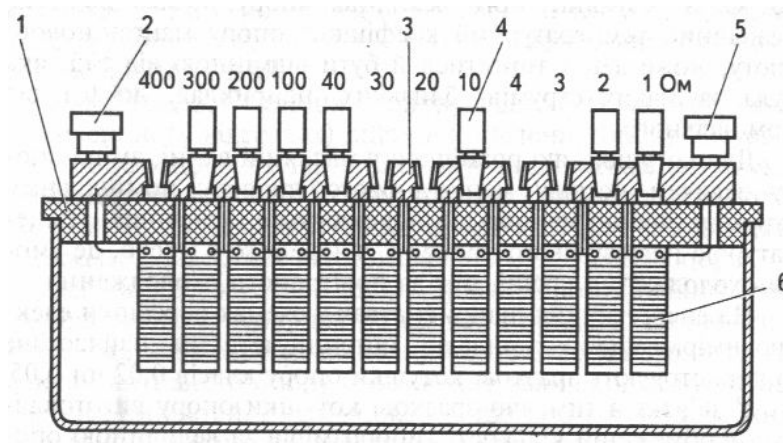


Рис. 3.3
Штепсельний магазин опорів

Більш зручними в користуванні є *важільні магазини опорів*. Приклад будови такого магазину показано на рис. 3.4. Цей магазин складається з трьох декад резисторів, однакових у кожній декаді (наприклад, 1; 10 та 100 Ом). Кількість декад може бути й більшою (чотири, шість). Всі опори кожної декади ввімкнуті послідовно, а величина опору магазину залежить від положення важелів перемикачів, які лишають в електричному колі магазину ту чи іншу кількість ввімкнутих опорів. У більшості цих магазинів перемикачі сховано під верхньою панеллю магазину, над якою містяться лише ручки, закріплені на осях важільних перемикачів. Послаблення притискування ковзних рухомих контактів до нерухомих у таких магазинах може призвести до збільшення електричного опору між рухомих і нерухомих контактами, завдяки чому опір магазину збільшується порівняно з тим, що показують ручки важільних перемикачів.

Це призведе до збільшення похибки магазина, особливо в тих випадках, коли на ньому виставлено малий опір.

У магазинах опорів, де остання декада складається з опорів величиною 10 000, 100 000 Ом або більше, через наявність малого проміжку між нерухомими контактами, розташованими поряд, може недопустимо зменшуватися поверхневий опір діелектрика, з якого зроблено панель, де

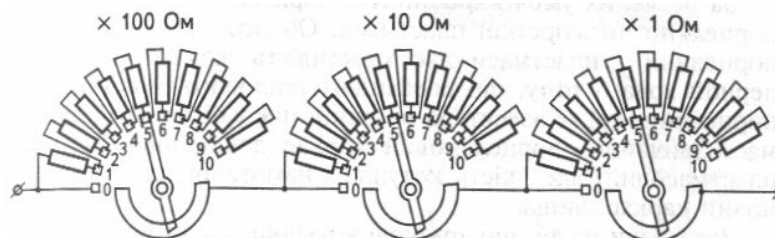


Рис. 3.4

Будова важільного магазину опорів

змонтовано ці контакти. Це можливе, коли у проміжок між нерухомими контактами потрапляє металевий пил від зношування контактів при тривалій експлуатації магазину опору. Цей поверхневий опір зменшує опір між контактами та може суттєво зменшити точність опору магазина.

Магазини опорів виробляють з класами точності 0,02, 0,05, 0,1, 0,2 і 0,5. Число, що позначає клас точності,— це найбільша допустима величина похибки опору магазина, виражена у відсотках. Цим же числом обмежуються величини додаткових похибок, які можуть статися при відхиленні умов його експлуатації від номінальних.

3.3. Зразкові котушки індуктивності та взаємної індуктивності. Зразкові міри ємності

Зразкові котушки індуктивності використовують у схемах вимірювальних мостів та потенціометрів змінного струму. Їх виробляють з величинами індуктивності від 0,0001 до 1,0 Гн, причому кожне номінальне значення величини індуктивності наступного типорозміру в 10 разів відрізняється від величини індуктивності котушки попереднього типорозміру.

Кожна з цих котушок являє собою багатовиткову обмотку з мідного ізольованого проводу, намотаного на каркас з ізоляційного стійкого матеріалу, який щонайменше змінює свою форму та розміри з часом і через вплив зовнішніх чинників (наприклад, температури довкілля, вологі повітря).

За реальних умов виробництва каркаси виготовляють із порцеляни чи жорсткої пластмаси. Об'єктивне порівняння порцеляни і пластмаси дає можливість віддати перевагу першій хоча б тому, що коефіцієнт теплового розширення порцеляни майже вдесятеро менший, ніж у більшості пластмас. Звичайно, порцеляновий каркас дещо дорожчий за пластмасовий, але якість котушки, намотаної на порцеляновий каркас, вища.

Зважаючи на те, що зразкові котушки індуктивності використовують на змінному струмі, й частину — на струмах підвищеної, а то й високої частоти, де величина індуктивності котушки залежить від ефекту витіснення струму зсередини проводу на поверхню, їх доцільно обмотувати літцендратом — проводом, який складається з

багатьох тонких провідників, кожен з яких вкритий емалевою ізоляцією, а всі разом — шовковою. Ці тонкі провідники переплетені між собою так, що на певній довжині проводу кожен із них перебуватиме майже на однакових відрізках довжини як у центрі перерізу проводу, так і на його периферії. Завдяки цьому ефект витіснення струму буде практично відсутній.

Будову зразкової котушки індуктивності показано на рис. 3.5, де 1 — це каркас котушки, 2 — обмотка котушки, 3 — затискачі, до яких приєднано початок і кінець проводу обмотки.

Слід зазначити, що в цих котушках індуктивності при роботі на відносно малих частотах, близьких до 50 Гц, чималу частину їхнього повного опору становить активний опір. Завдяки цьому добротність катушок, яка дорівнює відношенню реактивного опору до активного, загалом невелика й може не перевищувати 1,5 за індуктивності катушки 1 Гн при частоті струму 50 Гц. Майже такою ж буде й добротність решти катушок того самого розміру, але меншої індуктивності.

Катушки індуктивності, подібні зображеним на рис. 3.5, мають ще один істотний недолік — за наявності зовнішньо-

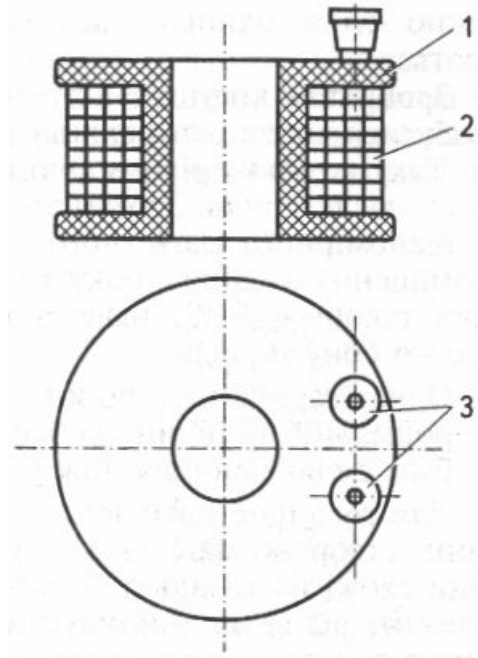


Рис 3.5
Катушка індуктивності

то змінного магнітного поля в їхніх обмотках виникає ЕРС, величина якої залежить від величини магнітної індукції цього зовнішнього поля, величини кута між віссю котушки і напрямом дії поля та від величини частоти. Величина цієї ЕРС непередбачувана, бо дві перші величини впливу (а то й усі три) заздалегідь невідомі, й тому ця ЕРС може значно спотворити результати вимірювань за схемою, до якої ввімкнено таку зразкову катушку.

Екранування таких катушок від дії сторонніх магнітних полів неможливе, бо екран впливатиме на величину власної індуктивності зразкової катушки й, головне

— зробити величину індуктивності цієї котушки залежною від частоти струму, який проходить по витках котушки.

Якщо ж очікуване магнітне поле в місці розташування котушки рівномірне, то, використовуючи *астатичну зразкову котушку індуктивності*, можна позбутися шкідливої дії стороннього магнітного поля. Астатична котушка складається з двох однакових частин, з'єднаних послідовно. Ці частини створюють власні магнітні потоки у взаємно протилежних напрямках. У таких котушках під дією зовнішнього рівномірного поля, тобто такого, яке має однакову індукцію в усіх точках простору, де розміщено вказані дві котушки, в обох виникають однакові ЕРС, які діють проти-лежно одна одній і, завдяки цьому, взаємно компенсуються.

Зробивши котушку індуктивності *тороїдальною*, можна позбутися шкідливого впливу рівномірного зовнішнього поля. Таку котушку рівномірно намотують на тороїдальну основу з діелектрика. Зрозуміло, що наведена дією зовнішнього рівномірного магнітного поля шкідлива ЕРС у витках, розміщених з одного боку тороїда, завжди буде компенсована такою ж ЕРС, наведеною у витках, розташованих з іншого боку тороїда.

Однак зауважимо, що й в астатичній конструкції, й в тороїдальній величина добротності котушок індуктивності буде дещо меншою, ніж у звичайних.

Для того щоб мати зразкову індуктивність змінної величини, створено магазини індуктивності. За своєю будовою вони схожі на важільні. У цих магазинах активний опір не залежить від величини індуктивності. Це досягнуто за допомогою додаткових активних резисторів, що вмикаються тими ж самими перемикачами, які змінюють величину індуктивності.

Зразкові котушки взаємоіндуктивності виготовляють на величину взаємоіндуктивності від 100 мкГн до 10 мГн. Як і котушки індуктивності, їх виконано на жорстких ізоляційних каркасах у вигляді двох паралельно розташованих котушок індуктивності, що розділені ізоляційною перегородкою. Зовнішній вигляд такої котушки та її розріз показано на рис. 3.6. На жаль, при такому виконанні котушки коефіцієнт зв'язку між її обмотками відносно невеликий і досягає лише величини близько 0,3.

Набагато більшим буде коефіцієнт зв'язку при намотуванні обох обмоток двома паралельними ізольованими проводами. У цьому разі зовні котушка мало відрізняється від котушки індуктивності, хіба що наявністю чотирьох затискачів, до яких приєднано кінці обмоток. При такому виготовленні котушки коефіцієнт зв'язку між обмотками буде близьким до одиниці, й котушка на певну величину взаємоіндуктивності буде економічнішою як за об'ємом, так і за витратами проводу, ніж та, що показана на рис. 3.6. Але наявність значної ємності між обмотками через ізоляцію проводів суттєво утруднює роботу таких котушок і на підвищених частотах і за наявності різниці напруг між обмотками.

Зразкові міри ємностей виконують як конденсатори постійної ємності з повітряним чи твердим діелектриком (переважно слюдяним). У разі необхідності використання багатозначних мір ємності застосовують повітряні конденсатори змінної ємності або магазини ємностей з конденсаторами, що мають твердий діелектрик.

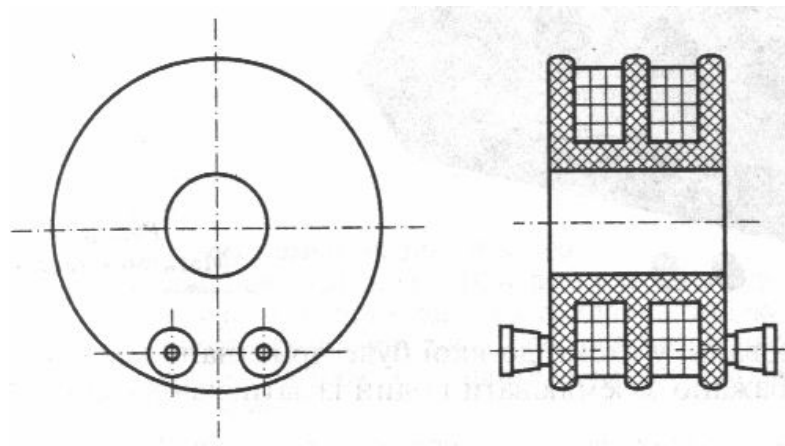


Рис. 3.6
Котушка взаємодуктивності

При проведенні практичних вимірів зразкова ємність має бути багатозначною. У таких випадках зручно користуватися саме магазинами ємностей, які можуть бути штепсельними або декадними з перемикачами. Ці магазини виготовляють на основі конденсаторів з твердим діелектриком. Найбільш досконалими, точними і довговічними є магазини зі слюдяними посрібленими конденсаторами. У таких конденсаторів кожну слюдяну платівку посріблено з двох сторін, завдяки чому з активної зони конденсатора вилучено ділянки, де може залишатися повітря чи волога, що знижують якість конденсатора. Серед твердих діелектриків слюда має найвищу пробивну напруженість електричного поля (до 80 кВ/мм). Тому товщина пластівців слюди у конденсаторі, виконаному на задану напругу, може бути меншою, порівняно з іншими діелектриками. Величина діелектричної проникності слюди мусковіта досить велика. Все це дає можливість зосередити в одиниці об'єму найбільшу величину ємності порівняно з іншими, стійкими до впливу зовнішніх чинників, твердими діелектриками.

Зовнішній вигляд магазину ємностей наведено на рис. 3.7. Третій затискач тут з'єднано з корпусом магазину. Його необхідно підімкнути до заземлення. Щоб зменшити рівень перешкод, які можуть впливати на точність

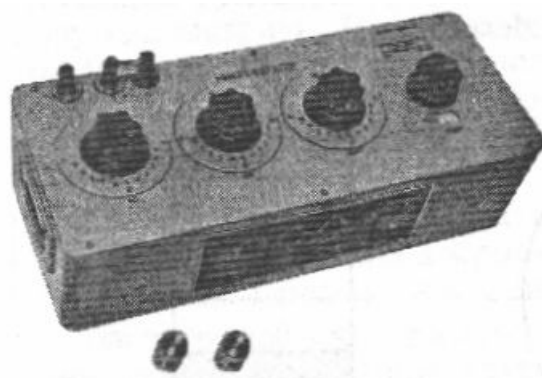


Рис. 3.7
Магазин ємностей

вимірювань, у схемі, до якої буде приєднано магазин ємностей, бажано заземлювати і один із затискачів ємності магазину.

Контрольні запитання:

1. Які нормальні елементи і чому слід застосовувати у переносних вимірювальних приладах?
2. Чому такий стійкий матеріал, як константан, недоцільно використовувати у зразкових котушках опору?
3. Які засоби використовують для того, щоб зразкові котушки опору можна було використовувати як на постійному, так і на змінному струмі?
4. З якого матеріалу й чому доцільно виробляти зразкові котушки індуктивності і взаємодуктивності?
5. Якими мірами можна зменшити вплив зовнішніх змінних магнітних полів на точність зразкових котушок індуктивності?
6. Яким саме проводом і чому доцільно виконувати обмотки зразкових котушок індуктивності?
7. Яким чином підтримують незмінність активного опору магазинів індуктивності за різних значень індуктивності?
8. Що таке добротність котушки індуктивності та як вона залежить від частоти струму?
9. Які діелектричні матеріали використовують у зразкових конденсаторах?

ЛЕКЦІЯ 4 ВИМІРЮВАЛЬНІ МЕХАНІЗМИ АНАЛОГОВИХ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

• **Аналоговими** називають такі електровимірювальні прилади, у яких вихідна величина, наприклад кут відхилення стрілки чи іншого показчика (хоча б світлового), відрахована за його шкалою, є аналогом вимірюваної фізичної величини.

Такі прилади, що дозволяють лише візуальне зчитування показів, називають показуючими, їм в основному і присвячено цей розділ. Окремо буде розглянуто аналогові реєструючі прилади, які ведуть запис показів у вигляді суцільної чи переривчастої лінії на градуйованій стрічці або диску.

Аналогові прилади, залежно від принципу дії їхніх вимірювальних механізмів, що перетворюють вимірювану фізичну величину у відхилення показчика вздовж шкали приладу, поділяються на *магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні, індукційні, теплові, електростатичні та вібраційні*.

Такі прилади щонайширше застосовують як на енергетичних підприємствах, так і в енергетичному господарстві більшості промислових підприємств.

4.1. Вимірювальні механізми магнітоелектричної системи

У вимірювальних механізмах магнітоелектричної системи (рис. 4.1) обертовий момент, який пересуває рухома частину приладу, виникає в результаті взаємодії магнітного поля, створюваного постійним магнітом 2, і електричного струму, який проходить по витках обмотки, що містяться в цьому полі.

У більшості таких механізмів ця обмотка рухома, виконана у вигляді рамки 6, закріпленої на кернях 9, які вільно обертаються у підп'ятниках 10, розміщених на кронштейнах 5. Струм до рухомої обмотки надходить по спіральних пружинах 8, які створюють протидійний момент при повороті рамки. Кут відхилення рухомої частини вимірювального механізму при вимірюванні відповідає рівності обертового моменту, створюваного рамкою, й моменту протидії, що виникає від дії пружин.

Для створення рівномірного поля в зоні переміщення активних сторін обмотки рамки вимірювальний механізм має центральний масивний циліндр 3, який виготовлено з магнітм'якого матеріалу, як і частини 1 і 4 вимірювального механізму. Для врівноважування рухомої частини зі стрілкою 7 використовують врівноважувальні тягарці 11. Обмотка рамки 6 може бути намотана на каркас, виготовлений з алюмінію, але іноді рамка може бути й безкар-касною.

Постійний магніт 2 виготовлено з магнітотвердого матеріалу, який має значну залишкову індукцію та велику коерцитивну силу (це — вольфрамова або хромово-нікель-алюмінієві сплави). Для багаторічного збереження незмінності показів приладу з таким вимірювальним механізмом магніти проходять спеціальну обробку (штучне старіння), після чого магнітна індукція у повітряному проміжку вимірювального механізму (саме там, де пересуваються активні частини рамки) практично не залежатиме від часу і майже не залежатиме від коливань температури. Через наявність значної величини магнітної індукції у повітряному проміжку на такі вимірювальні механізми майже не впливають зовнішні магнітні поля.

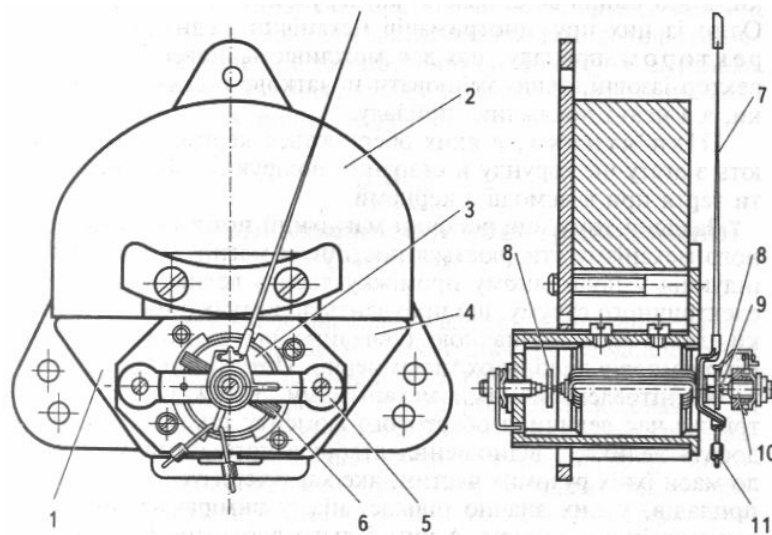


Рис. 4.1
Вимірювальний механізм магнітоелектричної системи

Каркас рамки являє собою не тільки конструктивну деталь вимірювального механізму, а й виконує функції Демпфера, що зменшує час заспокоювання коливань рухомої частини механізму. Така дія каркаса рамки пояснюється тим, що під час переміщення її у повітряному проміжку в каркасі індукується ЕРС та з'являється струм, який створює обертовий момент, спрямований проти на-прямку руху, що заважає коливанням рухомої частини і зменшує їх тривалість.

Керни, на які спирається рухома частина, зроблено з високоякісної сталі. Для зменшення тертя між кернами і підп'ятниками їх старанно полірують. Ці керни запресовують в алюмінієві букси, основу яких приклеюють до рамки. Пружини, які створюють протидійний момент та крізь які подається струм до обмотки рамки, виготовляють із бронзи та прилютовують кінцями до пружинотримачів, два з яких встановлено на рамці та з'єднано з кінцями її обмотки, а два інших встановлено на нерухомій частині приладу. Один із цих пружинотримачів механічно з'єднаний з коректором приладу, що дає можливість, повертаючи коректор іззовні, дещо змінювати початкове положення рамки, а з нею і покажчика приладу.

Підп'ятники, в яких обертаються керни, виготовляють з агату чи корунду й старанно полірують, аби зменшити тертя при взаємодії з кернами.

Завдяки тому, що робочий магнітний потік вимірювального механізму створюється постійним магнітом і магнітна індукція у повітряному проміжку досить велика, величина електричного струму, що проходить по витках обмотки рамки, може бути незначною (звичайно від кількох десятків мікроамперів до кількох міліамперів). Потужність, споживана магнітоелектричними механізмами, також незначна. В ;] той же час величина обертового моменту таких механізмів досить велика, і відношення створюваного ними моменту до маси їхніх рухомих частин, яке характеризує добротність приладів, у них значно більше, ніж у вимірювальних механізмів інших систем. А чим більша добротність приладу,

тим меншою буде його похибка від впливу тертя у підп'ятниках.

На основі магнітоелектричних електровимірювальних приладів виробляють прилади практично всіх класів точності (починаючи з класу 0,1).

Якщо магнітоелектричний вимірювальний механізм використовують у приладі відносно невисокого класу точності, то він може мати постійний магніт, який розміщено всередині рамки (замість циліндра 3). Цей магніт має бути намагніченим по діаметру. В цьому випадку необхідність у зовнішніх постійних магнітах відпадає, завдяки чому можуть бути значно зменшені зовнішні розміри і маса вимірювального механізму, а з ним — і всього приладу.

Магнітоелектричні прилади використовують для вимірювань на постійному струмі. Вони найчутливіші та здатні забезпечити найбільшу точність вимірювань порівняно з приладами всієї решти систем; широко використовуються як гальванометри, мікро- та міліамперметри, амперметри, вольтметри та омметри.

У сполученні з напівпровідниковими випрямлячами вони широко використовуються і для вимірів на змінному струмі (взяти хоча б добре відомі багатофункціональні прилади — тестери, що здатні вимірювати величини напруг і струмів як на постійному, так і на змінному струмі, та ще (за наявності у приладі гальванічних елементів) й електричні опори).

4.2. Вимірювальні механізми електромагнітної системи

У приладів електромагнітної системи вимірювальний механізм (рис. 4.2) складається з котушки 1, встановленої на нерухомій основі 2, та осердя 4, закріпленого на осі 6, разом зі стрілкою 3, крилом повітряного заспокоювача 7 та врівноважувальними тягарцями 9. У торцях осі 6 запресовано керни 11, які упираються у під'ятники 12. До пружино-тримача рухомої частини прилютовано один кінець про-тидійної пружини 8. Інший кінець цієї пружини прилютовано до пружинотримача, встановленого на важелі коректора 5, призначеного для встановлення вказівника (стрілки 3) на нульову позначку шкали. До каркасу котушки 1 звичайно прикріплене нерухоме осердя 10, яке використовують для деякого збільшення величини обертового моменту та для регулювання характеру шкали і встановлення потрібного найбільшого кута відхилення стрілки приладу за номінальної величини струму, що проходить по обмотці котушки.

Якщо по обмотці котушки протікає струм, рухоме осердя 4 втягується в щілину котушки й рухома частина повертається, пересуваючи стрілку приладу вздовж його шкали.

Стрілка має стати нерухомою в положенні, де обертовий момент, створений силою втягування рухомого осердя у щілину котушки 1, буде врівноважений протидіючим моментом пружини.

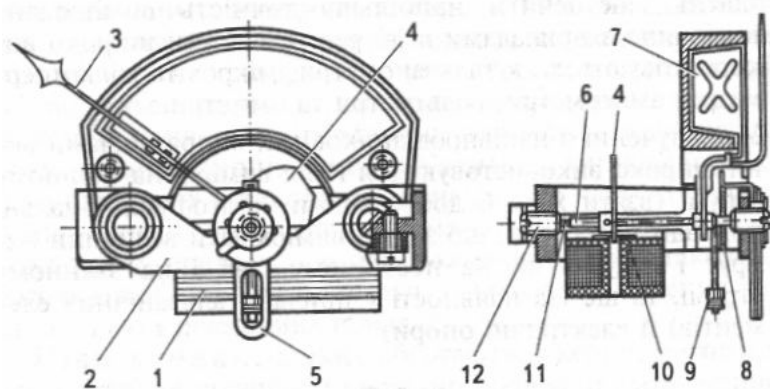


Рис. 4.2
Вимірювальний механізм електромагнітної системи

Щоб коливання рухомої частини вимірювального механізму (які обов'язково виникають за різкої зміни величини струму в обмотці котушки *1*) якомога швидше заспокоїлися, вимірювальний механізм має повітряний заспокоювач, що складається з крила *7*, закріпленого на рухомій частині, та камери з кришкою, всередині якої це крило рухається, маючи з усіх боків вузькі щілини, що відділяють це крило від стінок камери та кришки.

За належної якості матеріалу рухомого осердя *4*, як і нерухомого (а їх виготовляють, звичайно, з пермалою і відповідно термообробляють), електровимірювальні прилади, створені на основі таких електромагнітних вимірювальних механізмів, можуть бути використані для вимірювань у колах як постійного, так і змінного струму. В останньому випадку по шкалі приладу, градуйованій на постійному струмі, зчитуватиметься ефективно значення змінного струму.

Вимірювальний механізм електромагнітної системи використовують у:

- міліамперметрах; • амперметрах; • вольтметрах, і

Вимірювальні прилади електромагнітної системи виготовляються як лабораторні класів 0,5 і 1,0, так і як щитові класів 1,5; 2,5 і 4,0.

В енергетиці прилади, цієї системи мають чи не найбільше поширення.

4.3. Вимірювальні механізми електродинамічної системи

У вимірювальних механізмах електродинамічної системи (рис. 4.3.) обертовий момент, що діє на рухому частину, виникає при взаємодії струму, який протікає у проводі багатовиткової обмотки-рамки, закріпленої на осі рухомої частини механізму, з магнітним полем, створюваним нерухомою обмоткою.

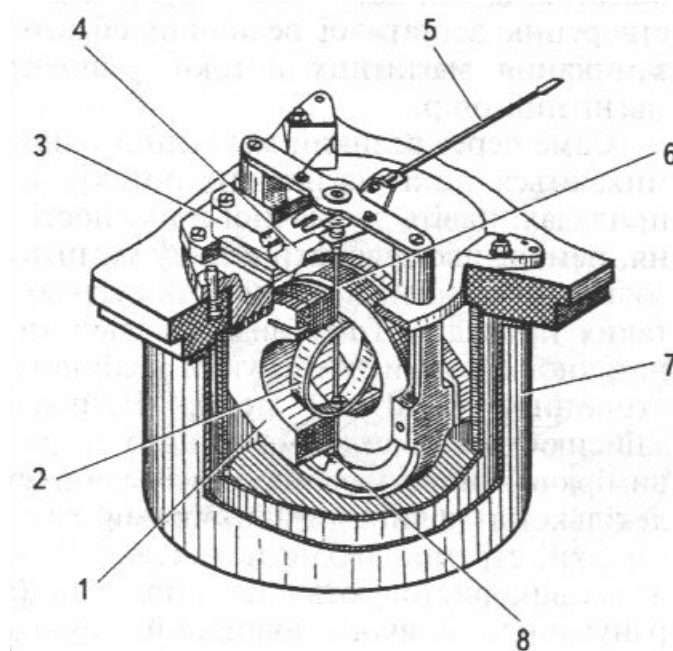


Рис. 4.3
Вимірювальний механізм електродинамічної системи

Вимірювальний механізм складається з нерухомої обмотки 1, рухомої обмотки-рамки 2, закріпленої на осі 6, яка повертається разом з нею. На цій же осі закріплено стрілку 5, сегмент (чи крило) заспокоювача коливань 4 та Деталі, що тримають спіральні пружини. До цих деталей прилютовано також проводи, що йдуть від рамки 2. Зовнішні кінці цих пружин прилютовано до струмопідводів, розміщених на ізоляційних втулках, встановлених на основі вимірювального механізму. Вісь рухомої частини приладу 6 встановлено на кернях у підп'ятниках 8. Сегмент заспокоювача 4 при повороті рухомої частини приладу переміщується між полюсами магніту 3 заспокоювача коливань. Пружини, по яких здійснюється струмопідведення до рамки, створюють момент протидії обертовому моментові вимірювального механізму.

Електродинамічні вимірювальні механізми застосовують у ватметрах, де вони забезпечують рівномірну шкалу. Ці механізми використовують також у амперметрах і вольтметрах. У цих випадках одержати рівномірну шкалу неможливо.

Важкою електродинамічних приладів є значна споживана потужність. Це зумовлено необхідністю створення їхніми обмотками великих магніторушійних сил, потрібних для створення достатньої величини обертових моментів у разі замикання магнітних потоків у повітрі, де діє значний магнітний опір.

Саме через великий магнітний опір шляху, по якому замикаються лінії магнітного потоку, в електродинамічних приладах, навіть за значної потужності власного споживання, неможливо створити велику магнітну індукцію. Через це зовнішні магнітні поля можуть суттєво впливати на покази таких приладів. Тому вимірювальні механізми електродинамічної системи потребують надійного захисту від впливу сторонніх магнітних полів. Найчастіше такий захист здійснюється шляхом магнітного екранування — вміщення вимірювального механізму всередині сталевих ємностей 7 з декількома щілинами і отворами для проходження стрілки, струмопідводів та вентиляції. У лабораторних приладах використовують навіть подвійне (а то й потрійне) екранування, за якого зовнішній екран вироблено з м'якої сталі, а внутрішній — з матеріалу, що має надзвичайно високу магнітну проникність — з пермалою, який попередньо пройшов відповідну термічну обробку.

4.4. Вимірювальні механізми феродинамічної системи

У вимірювальних механізмах феродинамічної системи (рис. 4.4) обертаючий момент створюється завдяки взаємодії струму, що протікає в рухомій рамці, з магнітним потоком, створюваним нерухомою обмоткою 3, розміщеною на феромагнітному осердді. Активні сторони рамки 1 розміщено у вузькій щілині між полюсами магнітопроводу 4 і циліндричним сталевим осердям 2, яке є непорушним і міститься всередині рамки. Струм до рамки підводиться через спіральні пружини 5.

Завдяки малому магнітному опоріву магнітного кола (бо на більшій частині магнітного кола магнітний потік проходить по феромагнітному осерддю) магніторушійна сила, що створюється нерухомою обмоткою 3, може бути відносно невеликою. Також незначною буде і потужність, споживана вимірювальним приладом, де застосовано подібний вимірювальний механізм.

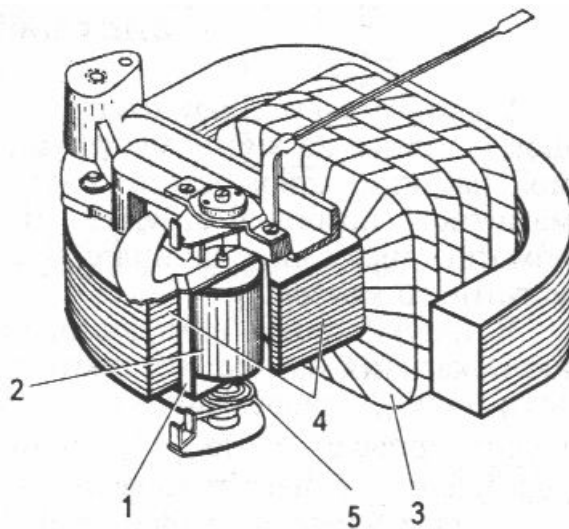


Рис. 4.4
Вимірювальний механізм феродинамічної системи

Щоб прилади з подібним механізмом можна було застосовувати як на постійному, так і на змінному струмі, феромагнітний магнітопровід 4 виконано шихтованим із тонких сталевих пластин. Циліндричне осердя 2 також виконують із тонких сталевих дисків.

Феродинамічні прилади, виконані на основі подібних вимірювальних механізмів, можуть мати невеликі розміри. Їх покази практично не залежать від впливу зовнішніх магнітних полів. Але щоб вони успішно працювали на змінному струмі, треба, щоб сталеві пластини, які застосовують у вимірювальних механізмах, мали невелику коерцитивну силу та малу потужність втрат при змінному струмі в обмотках.

На основі феродинамічних вимірювальних механізмів виробляють ватметри, вольтметри й амперметри.

У зв'язку з тим, що струм до обмотки рамки подається по тонких пружинках, у випадках, коли цей вимірювальний механізм застосовують у амперметрах, необхідне використання внутрішніх шунтів, якими проходить більша частина вимірюваного струму, а до рамки відгалужується лише незначна його частина, допустима для протікання пружинами без істотного їх нагрівання.

4.5. Вимірювальні механізми індукційної системи

У вимірювальних механізмах індукційної системи, які працюють тільки на змінному струмі, обертовий момент рухомої частини створюється внаслідок взаємодії змінного магнітного потоку зі струмами, індукованими в замкненій обмотці, диску чи у циліндрі зі струмопровідного неферо-магнітного матеріалу.

В індукційному вимірювальному механізмі з диском, що показаний на рис. 4.5, діють два змінних магнітних потоки — Φ_1 , створений дією обмотки 1, що міститься на магнітопроводі 2, та Φ_2 , створений дією обмоток 3, розміщених на магнітопроводі 4.

Обидва магнітопроводи з обмотками — нерухомі. Рухома частина вимірювального механізму складається з алюмінієвого диска 9, закріпленого на осі 10, що обертається в підп'ятниках 11.

При використанні індукційного вимірювального механізму в приладах зі

стрілкою момент протидії, що діє на рухому частину, створюється пружиною 7. Заспокоєння коливань рухомої частини створюється магнітоіндукційним заспокоювачем коливань 8.

При використанні індукційного вимірювального механізму в лічильниках електричної енергії змінного струму, що буває найбільш вірогідним в умовах енергетичного підприємства, пружина 7 відсутня, а протидійний момент створюється тим пристроєм, що й у тільки-но розглянутому випадку був використаний для заспокоювання коливань, тобто магнітом заспокоювача 8. За такого використання вимірювального механізму обмотка 1 звичайно вмикається на напругу джерела змінного струму, а обмотка 3 — у коло

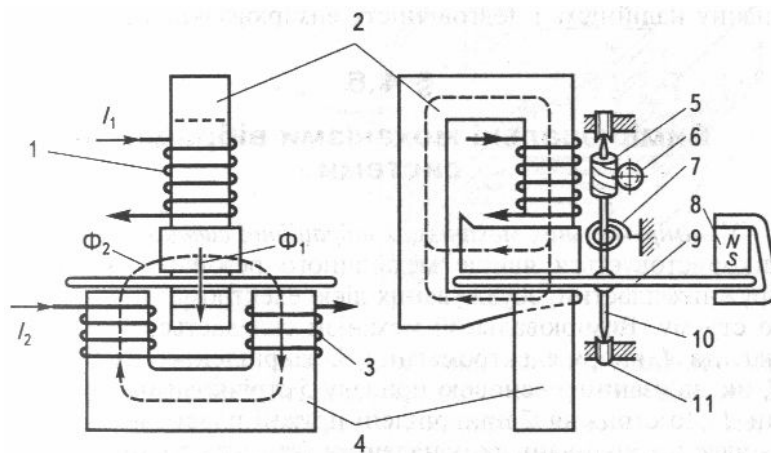


Рис. 4.5
Вимірювальний механізм індукційної системи

струму, який проходить від джерела до споживача. У цьому разі величина обертового моменту, створюваного механізмом, буде пропорційна споживаній потужності, як і швидкість обертання диска. Показання лічильника кількості обертів 6, зв'язаного з віссю рухомої частини черв'яком 5, будуть пропорційні величині споживаної активної енергії, яка надійшла від джерела до споживача.

Індукційні вимірювальні механізми широко застосовують у лічильниках електричної енергії змінного струму, проте їх можна також застосовувати у ватметрах, вольтметрах і амперметрах.

У вольтметрах і амперметрах обидві обмотки механізму 7 і 3 мають бути виконані на одну й ту саму величину струму: у вольтметрів — на десятки міліампер, а у амперметрів — на номінальний струм, контрольований цим амперметром.

Завдяки невеликій довжині ділянок проходження магнітного потоку в немагнітному середовищі (через повітря та алюміній) потрібна магніторушійна сила обмоток цього механізму та споживана ними потужність — невеликі. Разом з тим обертовий момент, створений такими вимірювальними механізмами, достатньо великий, що зумовлює значну надійність і довговічність вимірювальних приладів.

4.6. Вимірювальні механізми вібраційної системи

У вимірювальних механізмах вібраційної системи (рис. 4.6) використовується

явище механічного резонансу коливань пружних пластин, збуджуваних дією електромагніта змінного струму. Вимірювальний механізм складається з електромагніта 4, якоря електромагніта 3, закріпленого на стрижні 2, що зв'язаний з основою приладу 5 стрічковими пружинами 1. До стрижня 2 прикріплені пружні пластини 8, частота власних коливань яких налаштовується за допомогою напоявання різної кількості припою 7 на кінці пластин. При подачі на обмотки електромагніта змінної напруги якорь 3 починає вібрувати з частотою вдвоє більшою за частоту напруги, що живить обмотки (бо якорь за один період напруги двічі притягується й двічі відпускається при переході струму в обмотках через нуль).

Вібрація якоря через стрижень 2 передається пружним пластинам 8. Проте значна амплітуда вібрації спостерігається лише у тієї пластини, власна частота коливань якої збігається з частотою коливань стрижня (тобто у якої і власна частота коливань вдвоє більша за частоту напруги, прикладеної до обмотки електромагніта).

На основі подібних вібраційних вимірювальних механізмів створені частотоміри.

Шкалу 6 у них розташовано паралельно до ряду відігнутих пластин 8 і градуйовано за частотою напруги, що живить електромагніт. Про величину вимірюваної частоти дізнаються з того, проти якої з позначок шкали спостерігається найбільша амплітуда вібрації відігнутого кінця пластини.

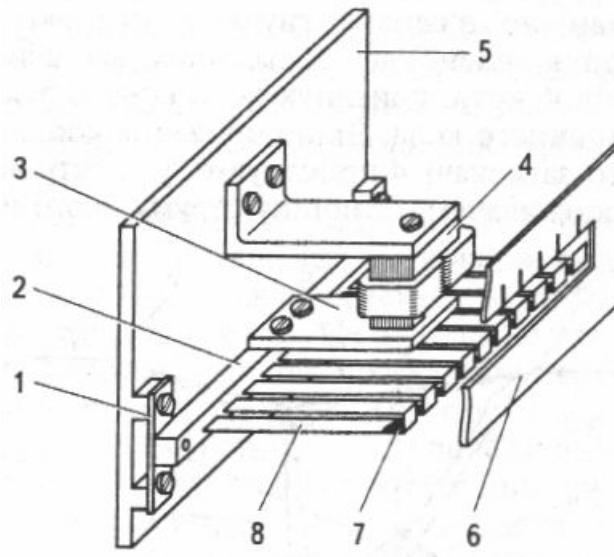


Рис. 4.6
Вимірювальний механізм вібраційної системи

У простіших конструкціях таких вимірювальних механізмів електромагніт, який живиться напругою вимірюваної частоти, може збуджувати коливання пружних сталевих пластин шляхом безпосередньої дії на них своїм магнітним полем.

Вібраційні частотоміри, виконані на основі вимірювальних механізмів вібраційної системи, застосовують на частотах від декількох десятків герц до 1500...1600 Гц.

4.7. Вимірювальні механізми теплової системи

У вимірювальних механізмів теплової системи (рис. 4.7) кутове переміщення

рухомої частини з покажчиком (стрілкою) відбувається під дією пружних сил натягнутої пружини 1 у разі деформації металевго дроту, крізь який проходить вимірюваний струм.

У цьому механізмі рухома частина складається з ролика 2, стрілки 3 та сектора заспокоювача коливань 8, закріплених на осі з кернами 6. Рухома частина механізму зв'язана з основою приладу через металевий дріт 5, гнучкі нитки 7 і пружину 1. Гнучка нитка 7 охоплює ролик 2 і перебуває завжди у натягнутому стані внаслідок дії сил пружності пружини 1 і металевго дроту 5, з яким вона механічно з'єднана гнучкою ниткою 7. Металевий дріт 5 прикріплено до ізольованих від основи приладу затискачів 4, котрі приєднують до контрольованого приладом електричного кола. Якщо прилад використовують як амперметр, то затискачі 4 приєднують у електричне коло послідовно зі і споживачем, величину струму якого вимірюють.

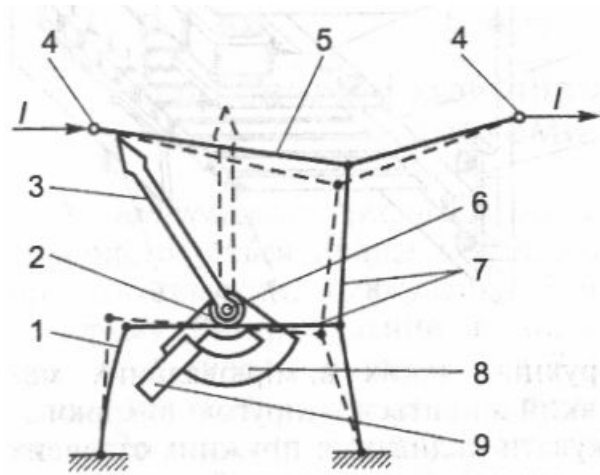


Рис. 4.7
Вимірювальний механізм теплової системи

Якщо ж такий вимірювальний механізм застосовувати у вольтметрі, то один із його затискачів приєднують до резистора додаткового опору, а вільні затискачі вимірювального механізму і вказаного резистора приєднують до тих точок електричного кола, між якими потрібно вимірювати напругу.

Звичайно товщини дроту 5 у вимірювальних механізмах амперметра і вольтметра мають суттєво відрізнятися. У механізмі, який бажано використати для амперметра, цей дріт має бути значно товщим за той, який бажано використати для вольтметра, бо йому належить витримати нагрів кон-| трельованим струмом (звичайно це одиниці — десятки ам-1 пер). Стосовно ж механізму, призначеного для вольтметра, то там товщина дроту має бути досить малою, щоб дріт був члатьний деформуватися від нагріву зовсім малим струмом, обмеженим резистором додаткового опору (це одиниці — десятки міліампер). Постійний магніт 9, поле якого взаємодіє з сектором 8, призначений для заспокоювання коливань рухомої частини приладу після зміни величини струму в дроті 5.

При протіканні струму металевим дротом 5 його температура підвищується. Дріт подовжується, що дає змогу пружині 1 перемістити гнучку нитку 7, що охоплює ролик 2. Це призводить до повороту ролика 2 і, разом з ним, до повороту осі рухомої частини механізму та до переміщення стрілки вздовж шкали.

Дріт 5 виготовляють із тугоплавкого матеріалу (з ніхрому чи зі сплавів платини). Шкала приладу, де використано такий вимірювальний механізм, завжди

стиснута в початковій своїй частині й розтягнута в кінці. Це зумовлене тим, що потужність, яка витрачається у дроті, пропорційна другому ступеневі величини струму, що по ньому протікає, а температура нагріву дроту й величина його подовження майже пропорційні цій потужності (тобто пропорційні другому ступеневі величини струму). Саме тому, якщо величину подовження дроту за номінального значення струму прийнято за умовну одиницю, за величини струму десь близько 20 % від номінального (це — $1/5$ від номінального), величина подовження дроту буде всього приблизно 0,04 (це $1/25$) від цієї умовної одиниці. Тобто при струмі $1/5$ від номінального відхилення стрілки вздовж шкали становить усього десь близько 4 % від загальної довжини шкали. Тобто початкова частина шкали зовсім непридатна для вимірювань. Саме з цієї причини у подібних приладів робоча ділянка шкали починається не менше ніж від $1/5$ номінального значення вимірюваної величини.

Заздалегідь встановивши ролик 2 на вісь 6 ексцентричне, можна трохи поліпшити характер шкали подібних приладів.

На основі вимірювальних механізмів теплової системи виконують вольтметри, міліамперметри та амперметри.

Такі прилади, порівняно з тими, що створені на основі вимірювальних механізмів, які ми розглянули раніше, мають незаперечну перевагу — малу залежність показань від величини частоти вимірюваних напруг і струмів. Це дає змогу рекомендувати прилади теплової системи при вимірюваннях як на постійному, так і на струмах промислової (50...60 Гц), підвищеної (до 10 000 Гц) і навіть високої частоти. Проте бажання використовувати теплові прилади на значних частотах потребує застосування якомога тоншого дроту 5 (щоб зменшити вплив поверхневого ефекту на підвищеній і високих частотах). Але чим тонший дріт, тим меншою буде його тепла інерція. А це призводить до того, що використання подібних приладів на дуже малих частотах (частки — десятки герц) стає неможливим через появу стійких коливань покажчика приладу з частотою, вдвоє більшою за частоту в контрольованому електричному колі.

Для роботи на струмах малих частот (їх часто називають струмами інфранизької частоти) розроблено теплові вимірювальні механізми з *термобіметалевими чутливими до електричного струму елементами*. Такі елементи створюють надзвичайно великі обертові моменти і мають значну теплову інерцію, завдяки чому ними можна користуватись у колах з інфранизькою частотою струмів.

У більшості випадків такі чутливі елементи самі є рухомою частиною вимірювального механізму.

4.8. Вимірювальні механізми електростатичної системи

У вимірювальних механізмах електростатичної системи (рис. 4.8) обертовий момент, що діє на їхню рухому частину, створюється за рахунок енергії електричного поля силами притягання, що виникають між різнойменне зарядженими провідниками.

У такому вимірювальному механізмі на металевій основі 1 закріплено стрижневий ізолятор 2 з розміщеними на ньому нерухомими електродами 9, між якими є металева прокладка 10, що забезпечує наявність повітряного проміжку між електродами. В цей проміжок заходить рухомий пелюсток-електрод 8, закріплений на осі 7 рухомої частини. На цій же осі закріплено дзеркало 6, яке відбиває промінь від освітлювача на шкалу приладу (освітлювач і шкала на рисунку не показані).

До кінців осі рухомої частини прилютовано кінці розтяжок 4, якими рухому частину закріплено на кронштейні 3, жорстко зв'язаному з основою 1. Ці розтяжки

також створюють протидійний момент при повороті рухомої частини механізму.

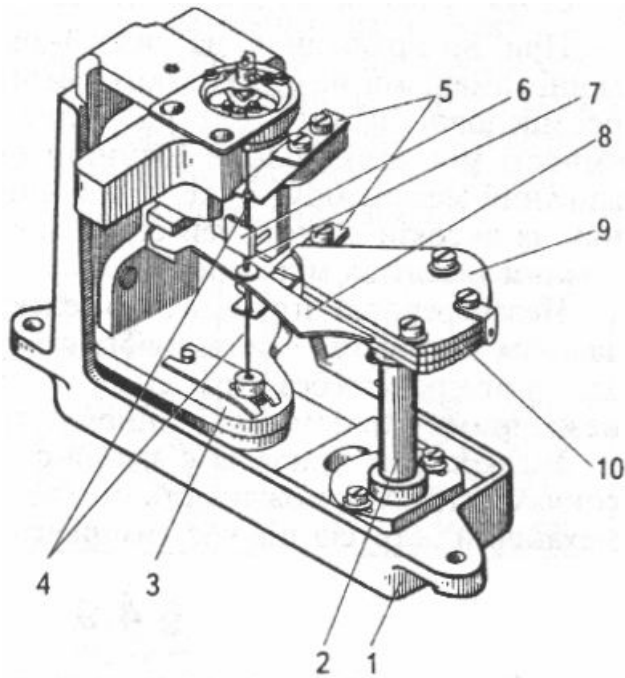


Рис. 4.8

Вимірювальний механізм електростатичної системи

Для того щоб запобігти обриву розтяжок при транспортуванні приладу з цим вимірювальним механізмом, застосовано обмежувачі 5 бічних переміщень осі рухомої частини.

При подачі вимірюваної напруги на нерухомі електроди 9 та на пелюсток-електрод 8 між ними виникає електричне поле. При цьому різнойменне заряджені електроди 9 і 8 намагаються притягнутися один до одного. В результаті пелюсток заходить у щілину між нерухомими електродами і обертає вісь рухомої частини, разом із дзеркалом, переміщуючи відбитий промінь по шкалі приладу доти, доки обертовий момент, створений пелюстком, зрівняється за величиною з моментом протидії розтяжок.

Щоб заспокоїти можливі коливання рухомих частин біля положення рівноваги між вказаними моментами, використовують магнітоіндукційний заспокоювач, що діє на пелюсток-електрод в його частині, протилежній тій, що взаємодіє з нерухомими електродами. Такі вимірювальні механізми електростатичної системи використовують у вольтметрах.

Характерною особливістю таких вольтметрів є можливість їх роботи як на постійному, так і на змінному струмі у великому діапазоні частот (аж до 20...30 МГц).

При вимірюваннях на постійному струмі електростатичні механізми не споживають енергії. На змінному струмі промислової частоти (50 Гц) через дуже малу величину ємності між електродами (одиниці пікофарад) струм, споживаний механізмом, дуже незначний. Але при вимірюваннях на високій частоті цей струм може досягти значної величини (десятків міліампер).

Незаперечною перевагою електростатичних вимірювальних механізмів є можливість створення вольтметрів, що здатні працювати без втрат енергії на

постійному струмі та з незначними втратами на змінному струмі за малих частот.

Вадою цих приладів є значні споживані струми на високих частотах й можливість остаточного виходу з ладу від механічних струсів під час вимірювань.

4.9. Вимірювальні механізми логометрів

Логометри — це вимірювальні прилади, показання яких і залежать від відношення двох величин, що сприймаються вимірювальним механізмом логометра. При цьому жодна з цих величин безпосередньо не вимірюється, а пропорційна зміна обох величин не впливає на величину кута відхилення покажчика (частіше — стрілки) рухомої частини механізму.

Логометричні вимірювальні механізми, що використовуються в логометрах, можуть бути:

- магнітоелектричними;
- електродинамічними;
- феродинамічними;
- електромагнітними.

Магнітоелектричні логометри найчастіше використовують для вимірювань електричних опорів за допомогою визначення відношення двох струмів: пропорційного величині напруги, до якої приєднано схему з приладом, та такого, що створюється тією самою напругою, але залежить від величини вимірюваного опору.

Головна особливість вимірювальних механізмів логометрів полягає в тому, що у них на рухому частину водночас діють два обертових моменти, направлених у різних напрямках, причому обидва вони створюються взаємодією електричних струмів, що протікають у двох різних обмотках, з магнітним полем, створеним постійним магнітом чи магніторухійною силою третьої обмотки, механічно не зв'язаної з першими двома.

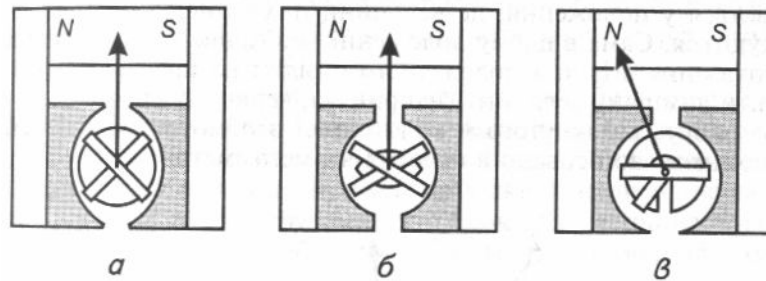


Рис. 4.9

Вимірювальні механізми магнітоелектричних логометрів

Логометричні вимірювальні механізми не мають пружин чи розтяжок, а струм надходить до обмоток, що розміщені на рухомій частині вимірювального механізму, через тонкі "безмоментні" струмопідводи, зроблені з малопружного металу, часто — з золота. Звичайно якийсь, дуже малий, момент такі струмопідводи все ж створюють, але його величина становить кілька десятих часток відсотка, порівняно з моментом дії, що його створює обмотка.

Можливі конструкції магнітоелектричних логометрів показано на рис. 4.9.

Для роботи логометра необхідно, щоб обертовий момент, створюваний обмотками, залежав від кута повороту рухомої частини. Така залежність досягається:

шляхом деякого зближення полюсних частин нерухомого магніта і відносно центрального циліндричного магнітопроводу (рис. 4.9, а); шляхом застосування центрального магнітопроводу складної форми (рис. 4.9, б); шляхом зміщення і центрального магнітопроводу складної форми вздовж вертикальної осі рисунка і застосування однієї звуженої обмотки, що має всього одну активну сторону, яка переміщується у повітряному проміжку, де діє магнітний потік (рис. 4.9, в).

За відсутності струмів у обмотках положення рухомої частини логометра невизначене. Тобто стрілка приладу, де за- і стосовано логометричний вимірювальний механізм, може перебувати в якому завгодно місці на шкалі. Однак при вимірюванні, коли в обмотках є струми і обертальні моменти обмоток діють один проти одного, рухома частина повертається у положення, де величини цих моментів врівноважуються. Саме в цьому положенні необхідно зробити відлік показання згідно з положенням стрілки на шкалі й визначити виміряну величину (наприклад, величину вимірюваного опору, ввімкнутого в коло однієї з обмоток, якщо цей механізм застосовано в омметрі чи мегомметрі).

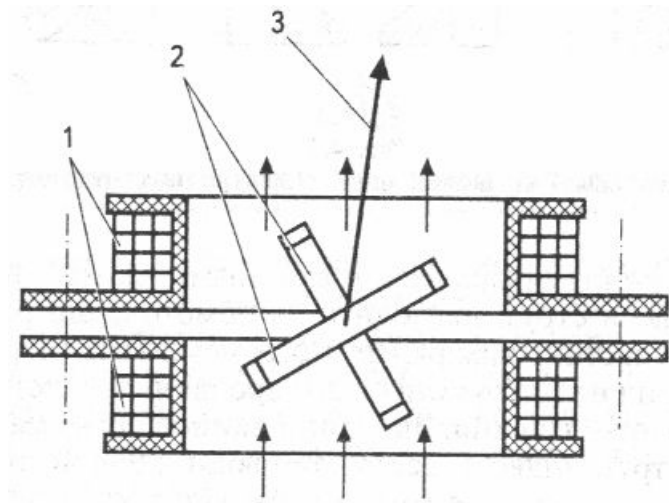


Рис. 4.10

Вимірювальний механізм електродинамічного логометра

В електродинамічному логометричному вимірювальному механізмі, який схематично зображено на рис. 4.10, є нерухомі котушки 1, які під дією струму створюють основне магнітне поле, в якому перебувають дві рухомі рамки 2, жорстко закріплені під кутом між собою і з віссю рухомої частини механізму, до якої також прикріплено стрілку 3.

На відміну від подібних механізмів магнітоелектричної системи, в електродинамічному логометричному вимірювальному механізмі не потрібні засоби одержання нерівномірного магнітного поля, що залежить від кута повороту рухомої частини механізму. Навпаки, у більшості електродинамічних логометрів нерухомі котушки роблять досить довгими, щоб одержати в місці дії рухомих рамок рівномірне магнітне поле. Зміни величини обертового моменту при повороті рухомої частини досягають природним шляхом, бо в такому полі величина обертового моменту залежить від величини кута між площиною рухомої рамки і напрямом ліній магнітного поля, створюваного нерухомими котушками.

Якщо площа рухомої котушки збігається з напрямом лінії поля нерухомих котушок, то величина обертового моменту, створеного рухомою рамкою, буде найбільшою і, навпаки, коли площа рухомої котушки є перпендикулярною лініям поля нерухомих котушок, то величина створюваного рамкою обертового моменту дорівнюватиме нулю.

Таким чином, розташувавши рухомі котушки під кутом одна до одної (у цих механізмів — це близько 90°), можна одержати, бодай у однієї з них, обертовий момент, незмінний за напрямом дії й зі змінною величиною, залежно від величини кута повороту площини рамки у магнітному полі. Цей обертовий момент використовують як момент протидії. В той же час обертовий момент другої рухомої рамки використовують як активний момент дії вимірювального механізму.

Аналогічно магнітоелектричним логометричним вимірювальним механізмам у електродинамічних механізмів початкове положення рухомої частини (за відсутності струму в котушках) буде невизначеним, а за наявності таких струмів стійке положення рухомої частини (і стрілки на шкалі приладу) відповідатиме рівності обертових моментів обох рухомих рамок.

Вимірювальні електродинамічні логометричні механізми використовують головним чином у вимірювальних приладах, що працюють на змінному струмі: у фазометрах, частотомірах, вимірювачах індуктивностей і ємностей. Принципово такі механізми можуть бути використані й на постійному струмі, наприклад, для вимірювання величин опору резисторів, термометрів опору тощо.

Але це робити недоцільно, бо при постійному струмі кращими все ж таки будуть подібні вимірювальні прилади, виконані на основі магнітоелектричних логометричних механізмів. Це пояснюється значно меншою споживаною потужністю, що має особливе значення у переносних приладах, де джерела живлення мають обмежену ємність і де використання приладів на основі електродинамічних логометрів призвело б до передчасного розряджування джерела живлення (сухих елементів чи акумуляторів).

Контрольні запитання:

1. Для якого виду електричного струму придатні магнітоелектричні прилади?
2. Який елемент створює магнітне поле у магнітоелектричному вимірювальному механізмі?
3. Яка сила приводить до дії рухоми частину електромагнітного вимірювального механізму?
4. Чим відрізняється феродинамічний вимірювальний механізм від електродинамічного?
5. Яка основна перевага феродинамічного вимірювального механізму над електродинамічним?
- в. Вкажіть найбільш раціональні способи захисту електровимірювальних механізмів різних систем від дії зовнішніх полів.
7. В яких вимірювальних приладах, що дуже часто використовуються в енергетиці, застосовують вимірювальні механізми індукційної системи?
8. В яких вимірювальних приладах застосовують вимірювальні механізми вібраційної системи?
9. В яких електровимірювальних приладах можуть бути використані механізми теплової системи?
10. Від дії якого зовнішнього чинника необхідно захищати електростатичні

вимірювальні механізми і як це робити?

11. Від чого залежить кут повороту рухомої частини логометричного вимірювального механізму?

12. В яких приладах використовують логометричні вимірювальні механізми?

13. Чому в логометричних вимірювальних механізмах відсутні пружини, які створюють протидійний обертовий момент?

14. За допомогою чого у логометричних вимірювальних механізмах магнітоелектричної, електродинамічної та феродинамічної систем електричний струм потрапляє до їхніх рухомих обмоток?

ЛЕКЦІЯ 5 ЕЛЕКТРОННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

• *Електронні вимірювальні прилади* — це поєднання електронних перетворювачів з аналоговими, частіше — магнітоелектричними, приладами. Вони призначені для вимірювань електричних або неелектричних величин (напруги, струму, частоти, зсуву фаз, опорів, температури, рівня тощо).

Майже в усіх випадках електронні прилади мають меншу потужність, споживану з вимірювальних кіл, і менше, порівняно з аналогічними за призначенням аналоговими електромеханічними вимірювальними приладами, впливають на ці кола. Відзначимо, що при цьому електронні прилади є значно складнішими за аналогові електромеханічні прилади за схемою, менш надійні й потребують стороннього джерела живлення. Втім попри все інше, електронні прилади весь час вдосконалюються в напрямі подолання вказаних недоліків і розширення своїх функціональних можливостей.

Розглянемо ряд електронних приладів, що вимірюють лише електричні величини.

5.1. Електронні прилади для вимірювання напруги

Найпростіший електронний прилад для вимірювання напруги — *вольтметр постійного струму* (він же й мілівольтметр) — складається з:

подільника напруги високого опору ПН;

транзисторного підсилювача ТП;

магнітоелектричного вольтметра V та джерела живлення ДЖ (рис. 5.1).

Основою вольтметра є електронний мікроамперметр з номінальним струмом 5 мкА, у котрого резистор R_{III} являє собою шунт із номінальною напругою 25 мВ.

Мілівольтметр і вольтметр із цього мікроамперметра одержали шляхом приєднання до вказаного шунта ряду резисторів $R_{10}...R_{18}$, які разом з опором R_{III} складають подільник напруги.

На рисунку показано подільник напруги з окремими гніздами для кожної номінальної напруги вольтметра. У багатьох випадках більш зручним вважають перемикання величин номінальних напруг за допомогою перемикача, але таке рішення не завжди доцільне, зважаючи на величину опорів резисторів, що відповідають найбільшим напругам (а величина опору резистора R_{18} сягає 150 МОм). Бо за таких величин опорів навіть наявність пилу на ізоляційній платі, де закріплено контакти перемикача, може суттєво змінити величину опору між початковим і кінцевим виводами цього резистора, а отже і внести похибку при вимірах високих напруг.

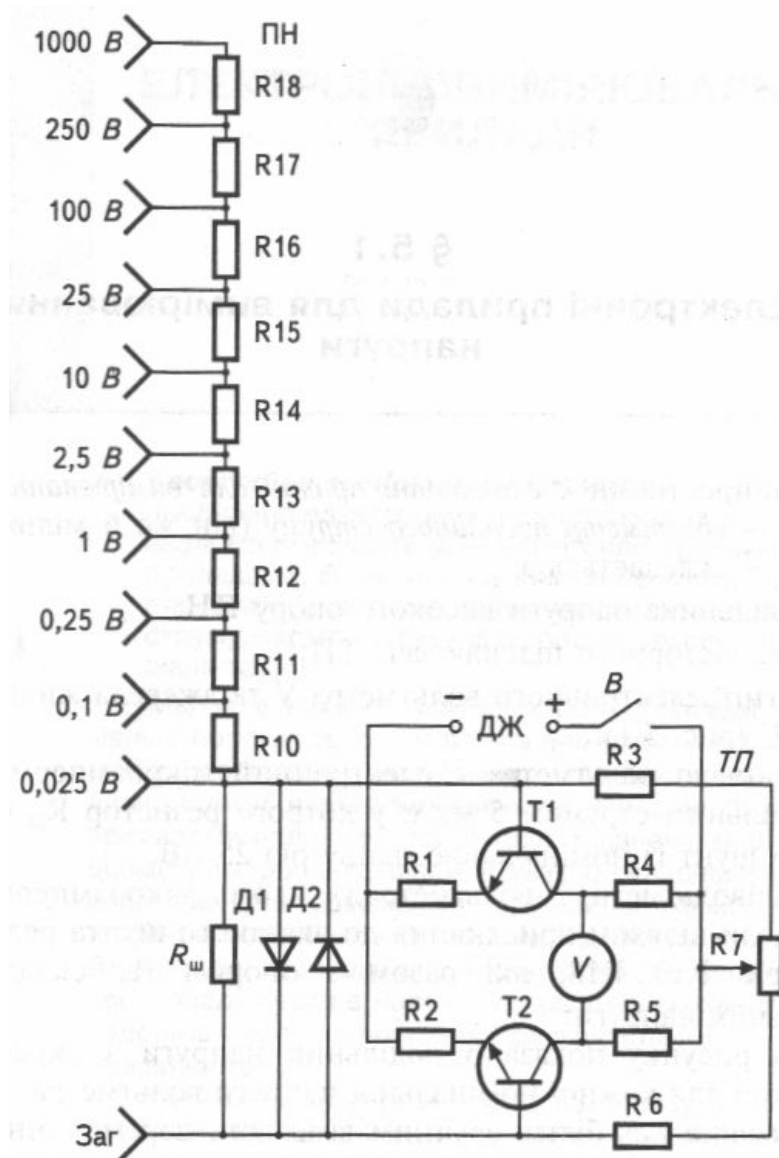


Рис. 5.1. Схема електронного вольтметра постійного струму на біполярних транзисторах

У розглянутій схемі (рис. 5.1) резистори R3 і R6 створюють початкове зміщення на базах транзисторів T1 і T2, що дає можливість вибрати найбільш доцільну ділянку характеристики підсилення транзисторів з метою одержання кутів відхилення показчика мікроамперметра, пропорційних вимірюваним напругам. Для початкового встановлення нуля на мікроамперметрі при відсутності вимірюваної напруги при дещо відмінних характеристиках транзисторів T1, T2 у схемі підсилювача передбачено регульований резистор R7.

Паралельно-зустрічне з'єднані діоди D1 і D2 захищають транзистори T1 і T2 від пошкодження в разі помилкового вмикання значної вимірюваної напруги, коли прилад має вимірювати напруги меншої величини. У таких випадках деяке допустиме підвищення напруги хоч на одному з діодів призведе до значного зменшення опору цього діода і до шунтування ним входу підсилювача, а також і до збільшення падіння напруги на опорах подільника напруги.

Звичайно, застосування транзисторного підсилювача дає можливість створити вольтметр з дуже великим входним опором, відповідно малими споживаними струмом та потужністю, що у десятки разів менші, ніж у електромеханічних приладів. Але часто й ці малі струми можуть бути сумірними зі струмами, що є у схемах, контрольованих подібними вольтметрами, і це призводить до зміни режиму схеми, де виконують вимірювання. Зовсім незадовільними можуть бути результати вимірювань цими вольтметрами, якщо в процесі вимірювань доводиться змінювати межі вимірювань напруги, що призведе до ступінчастої зміни режиму роботи схеми, де застосовано такий електронний вольтметр.

Ці небажані явища значною мірою зменшені в електронних вольтметрах, де підсилювач виконано на польових транзисторах, які не потребують струму для керування ними, бо керуються не струмом, а електричним полем, створеним вимірюваною напругою.

Звичайно, і при використанні таких транзисторів потрібні подільники напруги, щоб змінювати межі вимірювань, зле, по-перше, порівняно з попереднім, величину опорів подільників можна ще збільшити, а, по-друге, подільники можна виконати з постійною величиною опору, бо зміну границь вимірювання можна досягти перемикаючи вхід підсилювача на різні частки подільника.

Схему електронного вольтметра з підсилювачем на польових транзисторах зображено на рис. 5.2. У цього вольтметра величина опору між входними гніздами становить 10 МОм незалежно від положення перемикача границь вимірів П.

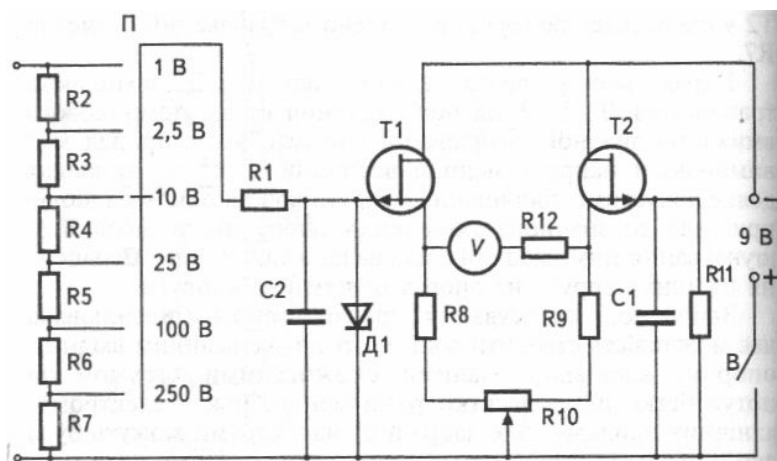


Рис. 5.2. Схема електронного вольтметра на польових транзисторах

Щоб вимірювати напругу змінного струму, у вхідне коло подібних вольтметрів вмикають напівпровідниковий випрямляч. У цьому разі доцільно розділювати шкалу вольтметра V — одну на постійному струмі, а іншу — на змінному. Іноді намагаються використати ту саму шкалу для вимірювань напруг як постійного, так і змінного струму, але це дещо складніше.

5.2. Електронні прилади для вимірювання струму

Дуже малі струми, порядку одного — кількох мікроампер, звичні для мікроелектронних схем, не можна виміряти електромеханічними приладами, не

впливаючи на режим роботи схеми, де проводять ці виміри. Але за наявності попереднього підсилення струму десь у 10...50 разів, вимірювання і таких малих величин струмів стає можливим. Таке підсилення можна здійснювати за допомогою паралельно-балансної схеми, що є основним вузлом *електронного мікро-амперметра*, зображеного на рис. 5.3. На основі аналогічної схеми виконано й *електронний вольтметр* (див. рис. 5.1). Схожість основних вузлів цих схем призводить до того, що часто виробляють комбіновані прилади, за допомогою яких вимірюють і напруги, і струми при нескладних перемиканнях.

Для вимірювання струмів після введення в дію вимикача В, за допомогою змінного резистора R7 встановлюють такі величини струмів зміщення, що проходять крізь резистори R5 і R6, при наявності яких показчик мікроамперметра, ввімкнутого між колекторами транзисторів T1 і T2, перебуватиме на нульовій позначці шкали. Після цього з надходженням вимірюваного струму I_B , який створює деяку напругу на резисторі $R_{ш}$, з'являється різниця напруг між базами транзисторів T1 і T2 та змінюються струми, що проходять крізь бази цих транзисторів. Це збільшує колекторний струм одного транзистора та, водночас, зменшує колекторний струм іншого, а в результаті призводить до відхилення показчика мікроамперметра. Величина струму, що відповідає відхиленню показчика приладу до кінцевої позначки шкали при номінальному значенні вимірюваного струму I_{BH} , регулюється зміною величини регульовального опору R6. Цього можна досягти й змінюючи величини опору шунтового резистора $R_{ш}$, але робити це небажано, бо доцільно, щоб величина цього опору була такою, аби при номінальному значенні вимірюваного струму I_{BH} величина напруги, що є в цьому випадку між точками а і б схеми, мала б величину, кратну одній з дозволених Держстандартом величин номінальних напруг вольтметрів. У цьому разі прилад може бути використаний і як мікроамперметр, і як мілівольтметр з малим власним споживаним струмом.

Стійкій роботі підсилювача у розглянутій схемі (рис. 5.3) сприяє наявність негативного зворотного зв'язку, створюваного в емітерних колах транзисторів опорами R3 і R4.

Звичайно, перевірка електронного мікроамперметра з номінальним струмом у кілька мікроампер пов'язана зі значними труднощами через нестачу відповідних зразкових приладів високого класу точності чи зразкових мір опору значної величини для використання їх у вимірювальних схемах з потенціометрами

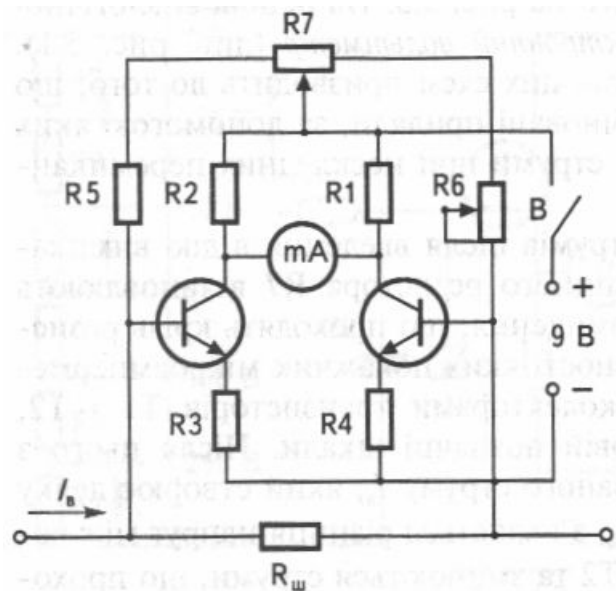


Рис. 5.3. Схема електронного мікроамперметра

5.3. Електронні осцилографи

• **Електронний осцилограф** — це вимірювальний прилад з електронно-променевою трубкою, призначений для дослідження та реєстрації швидкоплинних процесів у електричних колах.

У більшості випадків електронні осцилографи використовують для досліджень періодично змінюваних процесів. Але при використанні електронно-променевих трубок з післясвіченням осцилографами можна користуватись і для досліджень неперіодичних, одноразових процесів. Цими приладами можна вимірювати величини' напруги, струму, частоти, зсуву фаз, досліджувати форму кривої змінної напруги, визначати характеристики' магнітних матеріалів та нелінійних опорів.

Їх можна використовувати як нуль-індикатори у схемах порівняння напруг змінного струму.

Власне прилади, що їх називають "електронними осцилографами", було б правильно називати осцилоскопами, бо вони самі, без фотографічного апарата, кіно- або телевізійної камери не здатні записувати чи вирисовувати вимірювані величини, а дають змогу їх лише розглядати. Але таку назву за ними закріплено історично й написи з такою назвою друкують у технічних описах цих приладів і позначають на корпусах.

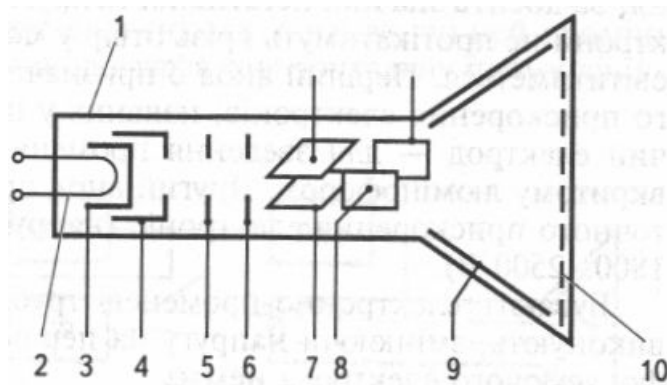


Рис. 5.4

Будова електронно-променевої трубки з електростатичним відхиленням променя

У зв'язку з тим, що основним вузлом у електронному осцилографі є електронно-променева трубка, доцільно розглянути її будову (рис. 5.4). Виконана ця електронно-променева трубка на основі скляного балона 1, виготовленого з товстого скла, здатного витримати атмосферний тиск, бо з балона відкачано повітря. На передню частину балона зсередини нанесено люмінесцентний екран, який має здатність світитися у тому місці, куди влучатиме електронний промінь. У трубці підігрівач 2 при проходженні по ньому струму розжарювання розігріває циліндричний катод 3 з оксидним покриттям, яке полегшує випромінювання з нього електронів. Катод з боків і спереду оточений керуючим елементом — модулятором 4, який має у своїй круговій частині невеликий отвір, крізь який частина електронів, випромінювана катодом у вигляді розфокусованого променя, прямує повз перший анод 5, фокусуючий електрод 6, електроди вертикальної розгортки 7, електроди горизонтальної розгортки 8, повз другий анод 9 на люмінесцентний екран 10. На шляху проходження крізь перший анод 5 та фокусуючий електрод 6 електронний промінь остаточно фокусується, так що у місці його падіння на екран 10 діаметр променя не перевищує 0,5...0,7 мм.

Підігрівач 2 живиться змінним струмом при напрузі 6,3 В. Напруга на модуляторі 4 негативна відносно катода 3 і становить від кількох десятків до кількох вольт. Змінюючи величину напруги модулятора відносно катода, можна регулювати кількість електронів, що вилітають крізь отвір модулятора, і тим самим змінювати яскравість свідчення екрана у місці падіння сфокусованого на нього електронного променя. За досить значної негативної напруги на модуляторі електрони не протікатимуть крізь отвір у модуляторі й екран не світлитиметься. Перший анод 5 призначений для початкового прискорення електронів, наявних у промені, а фокусуючий електрод — для зведення променя в точку на екрані, вкритому люмінофором. Другий анод призначено для остаточного прискорення електронів (напруга на ньому досягає 1800...2500 В).

Бувають електронно-променеві трубки, де фокусування виконують, змінюючи напругу на першому аноді, а окремо фокусуючого електрода немає.

Пари пластин 7 і 8 призначено для відхилення електронного променя у напрямі потрібної координати. Ці відхилення будуть тим більшими, чим більшою буде напруга між відповідними пластинами. Напрямок відхилення залежатиме від полярності напруги, прикладеної до відповідної пари пластин.

Залежно від найвірогідніше швидкості процесу, який спостерігатимуть на екрані трубки, люмінесцентні покриття екранів можуть бути *малоінерційними*, з

середнім часом післясвічення (до 0,1 с), чи інерційними. Після того як процес уже закінчився, інерційні покриття можуть зберігати зображення на екрані ще протягом 10...16 с, а то й більше.

Структурно-функціональну схему електронно-променевого осцилографа показано на рис. 5.5. Досліджуваній електричній сигналу подають на гнізда, позначені як Y . Подільником напруги ПНУ величина напруги досліджуваного сигналу знижується до рівня, придатного для підсилення на попередньому підсилювачі ППУ (а це десятки — соті частки вольт) і підсилюється ним, а потім і підсилю- і вачем вертикального відхилення ПВВ, вихідні затискачі якого з'єднано з пластинами вертикального відхилення електронного променя електронно-променевої трубки ЕПТ. разом з тим попередньо підсилений досліджуваній сигнал через правий (на схемі) контакт перемикача сигналів синхронізації $П_{синх}$ проходить на вхід пристрою синхронізації ПС а через нього — на генератор розгортки ГР, який генерує напругу пилоподібної форми, такої, як показано на рисунку. Після підсилення цієї напруги підсилювачем ППВ, напруга створює між вертикально розташованими пластинами горизонтальної розгортки електричне поле, яке з часом рівномірно збільшуючись, відхиляє електронний промінь. Якщо напруги на гніздах Y немає, то цей промінь креслить на екрані осцилографа горизонтальну пряму лінію.

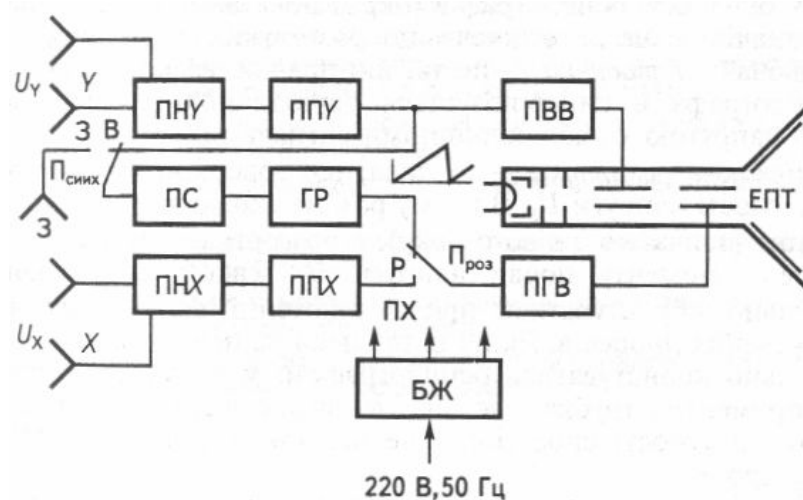


Рис.5.5

Структурно-функціональна схема електронно-променевого осцилографа

Якщо ж напруга на гніздах Y є, то на електронний промінь одразу діятимуть дві взаємноперпендикулярні си-. ли, завдяки чому цей промінь креслитиме залежність на- пруги, прикладеної до гнізд Y , від часу, наприклад синусоїду напруги мережі, якщо гнізда Y з нею десь з'єднані, тощо.

Важливе значення у роботі осцилографа має пристрій синхронізації ПС, який дає змогу за допомогою попередньо підсиленої напруги U_Y керувати роботою генератора розгортки, а точніше — примушувати його починати роботу, тобто пересувати електронний промінь уперек екрана у певний час, наприклад у момент початку збільшення напруги U_Y від нуля у позитивний бік. Це сприятиме тому, що за періодично горизонтальної розгортки всі наступні зображення періодично-змінної напруги точно накладатимуться одне на одне і зображення на екрані буде стійким, як нерухомий рисунок.

При бажанні керувати розгорткою за допомогою зовнішнього сигналу, перемикач синхронізації ($P_{\text{синх}}$) переводять у положення "З" (зовнішня). В цьому разі внутрішній зв'язок між напругою U_X , що спостерігається, і розгорткою розривається.

У більшості осцилографів (окрім показаних на схемі перемикачів) є ще перемикач виду розгортки: "періодична — чекаюча". *Періодична* — це та, що працює весь час роботи осцилографа й синхронізується періодичною досліджуваною напругою U_Y або зовнішніми сигналами.

Чекаюча розгортка — це така, що зовсім не працює за відсутності напруги U_Y . В цьому разі на екрані є лише світна крапка (звичайно з лівого боку), а розгортка починає діяти лише з моменту появи напруги U_Y . Такою розгорткою доцільно користуватись при дослідженні випадкових чи імпульсних процесів. Якщо ці процеси не повторюються, то доцільно користуватись осцилографом, у якому електронно-променева трубка має значне післясвічення, бо в разі його відсутності спостерігач не встигає розгледіти подробиці процесу.

Іноді необхідно розглядати водночас дві напруги у взаємодії. У таких випадках перемикач $P_{\text{роз}}$, який переводять у нижнє положення, зовсім вимикає розгортку, а на пластини X, що керують променем, подають поділену ПНХ і підсилену підсилювачами ППХ і ПГВ напругу, що надходить із гнізд X.

У цьому разі на екрані електронно-променевої трубки будуть викреслюватись так звані фігури Ліссажа, за якими можна визначити величину кута зсуву фаз між напругами U_X і U_Y , досить точно виміряти величину частоти невідомого джерела змінного струму тощо.

Контрольні запитання:

1. Що являє собою електронний електровимірювальний прилад?
2. Які переваги мають електронні прилади порівняно з електромеханічними?
3. Які недоліки електронних приладів порівняно з електромеханічними?
4. Чому зміна величин опору подільника напруги, звичайна для електромеханічного приладу при зміні границь вимірювання, шкідлива для вимірювань у схемах з малою потужністю їхніх елементів?
5. Як у електронних вольтметрів на польових транзисторах підтримується незмінність опору подільника напруги при перемиканнях границь вимірювань?
6. Яку перевагу мають електронні прилади при вимірюваннях величин струму, порівняно з магнітоелектричними приладами, що працюють із шунтами?
7. Які величини можна вимірювати за допомогою електронного осцилографа?
8. Для чого слугує в електронно-променевої трубки модулятор?
9. Як змінюють положення променя трубки електронного осцилографа?
10. З якою метою в електронному осцилографі використовують вузол синхронізації?
11. Яку форму має напруга горизонтальної розгортки у електронного осцилографа?

ЛЕКЦІЯ 6 ПРИСТРОЇ ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ ГРАНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

Електровимірювальні прилади Виробляють на обмежені діапазони вимірювання як за величин струму, так і за величин напруг.

Обмеження діапазонів вимірювання у приладах пояснюється складністю створення приладів на високі напруги і великі струми, зумовлені, перш за все, умовами безпеки користування приладами, що містяться в безпосередній близькості від спостерігача. та складністю підведення проводів і шин значної площі перерізу до приладів, зібраних разом на щитах і пультах.

Для забезпечення можливості безпечного і нескладного вимірювання яких завгодно величин напруг, струмів, потужностей та інших електричних величин, розроблено ряд пристроїв, що дають можливість наявними приладами, тобто приладами, призначеними для вимірювань електричних величин помірної величини, вимірювати дійсні електричні величини значного розміру, не сприйнятні до прямих вимірювань цими приладами. До таких пристроїв слід віднести шунти, додаткові опори та вимірювальні трансформатори струму і напруги. Всі ці пристрої є перетворювачами відповідних електричних величин на електричні, сприйнятні для вимірювання.

6.1. Шунти. Розширення меж вимірювання струмів електроприладами

• **Шунт** (електричний) — це електричний провідник, що приєднується для відведення частини електричного струму в обхід даної ділянки електричного кола.

Це резистор, виконаний з манганінових дротів, стрижнів або штаб, жорстко приєднаних з обох кінців до мідних чи латунних наконечників. Кожний з наконечників має два отвори: один значного діаметра, для приєднання провідника, по якому протікає вимірюваний струм, і другий, малого діаметра, для приєднання провідника, що йде до вимірювального приладу — магнітоелектричного мілівольтметра. Шунти виготовляють на номінальні струми до 7500 А. Кілька шунтів із позначенням їхніх номінальних струмів показано на рис. 6.1. У зв'язку з тим, що шунти розраховано на приєднання до них магнітоелектричних мілівольтметрів, опір цих шунтів підганяють до такої величини, щоб при номінальному струмі шунта падіння напруги на ньому становило 45, 75 або 120 мВ (перші дві напруги мають перевагу). Шунти, виконані на великі величини струмів, — стаціонарні, призначені для жорсткого кріплення до нерухомих конструкцій. Часто такі шунти встановлюються безпосередньо на струмоведучих шинах, над місцем їх розриву. Мілівольтметр до шунта приєднують за допомогою каліброваних провідників. Шунти, виконані на відносно невеликі струми, частіш за все — переносні. Шунти на відносно малі струми можуть бути виконані на декілька границь вимірювання. Схему універсального шунта, призначеного на кілька номінальних струмів і розрахованого при цьому на використання лише одного мілівольтметра, зображено на рис. 6.2.

У разі вимірювань величини струмів із застосуванням шунтів треба враховувати, що мілівольтметр, який показує величину струму, перебуває під напругою, що відповідає

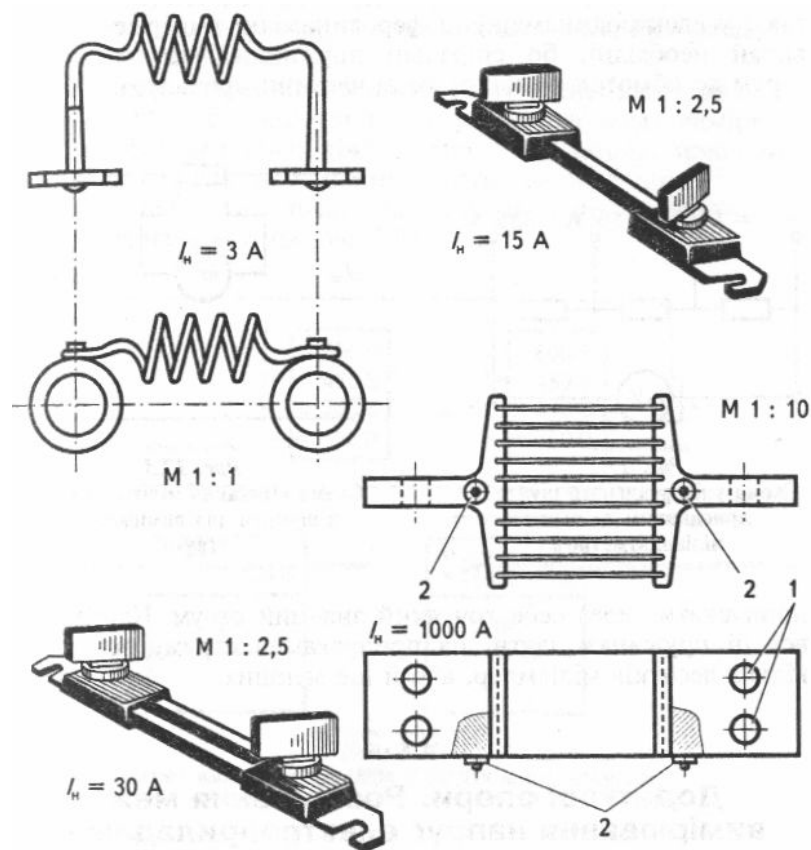


Рис. 6.1. Електричні шунти

величині напруги у точці кола, де приєднано шунт. І якщо ця напруга висока, то поводитись з приладом і проводами, що приєднані до нього, слід відповідно до правил безпеки праці. Схема вмикання шунта з мілівольтметром для вимірювання струму зображена на рис. 6.3.

Окрім описаних зовнішніх шунтів, що використовуються лише з магнітоелектричними мілівольтметрами, у приладах бувають *внутрішні шунти*. Такі шунти індивідуальні для кожного приладу і вмонтовуються як у магнітоелектричні, так і у електродинамічні та феродинамічні амперметри, де вкрай необхідні, бо спіральні пружинки, що підводять струм до обмоток рамок рухомої частини приладу, нездатні

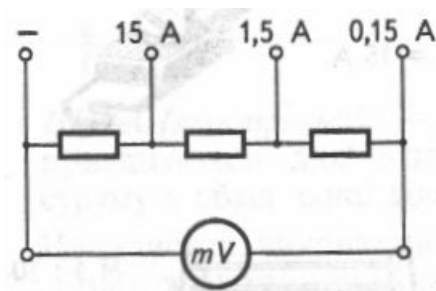


Рис. 6.2. Схема універсального шунта з приєднаним до нього мілівольтметром

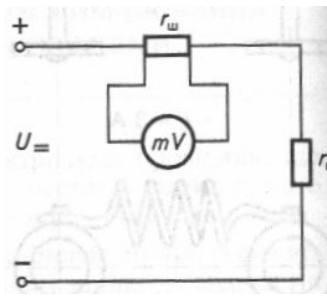


Рис. 6.3. Схема вмикання мілівольтметра з шунтом для вимірювання струму

пропускати через себе хоч який значний струм. Частіш за все ці пружинки здатні на пропускання струму всього у кілька десятків міліампер, або й ще менших.

6.2. Додаткові опори. Розширення меж вимірювання напруг електроприладами

• **Додатковий опір** — це набір точно підібраних елементів опору (катушок, пластин), об'єднаних у одному корпусі й призначених для вмикання послідовно в коло вольтметра або в коло напруги ватметра для збільшення межі вимірювання напруги вольтметра чи межі напруги ватметра.

Для роботи з магнітоелектричними вольтметрами виробляють додаткові опори на величини номінальних струмів 3; 5; 7,5 мА. Для роботи з електродинамічними або електромагнітними вольтметрами чи з колом напруги електродинамічних ватметрів виробляють додаткові опори з номінальними струмами 15 і 30 мА.

Додаткові опори можуть розширювати межі вимірювання напруги до 3000 В.

Додаткові опори мають елементи з активним опором і захисний корпус. Якщо цей опір розширює межі вимірювань до високих напруг, то його металевий корпус повинен мати затискач для приєднання проводу заземлення.

Схему вмикання додаткових опорів з вольтметром та ватметром наведено на рис. 6.4.

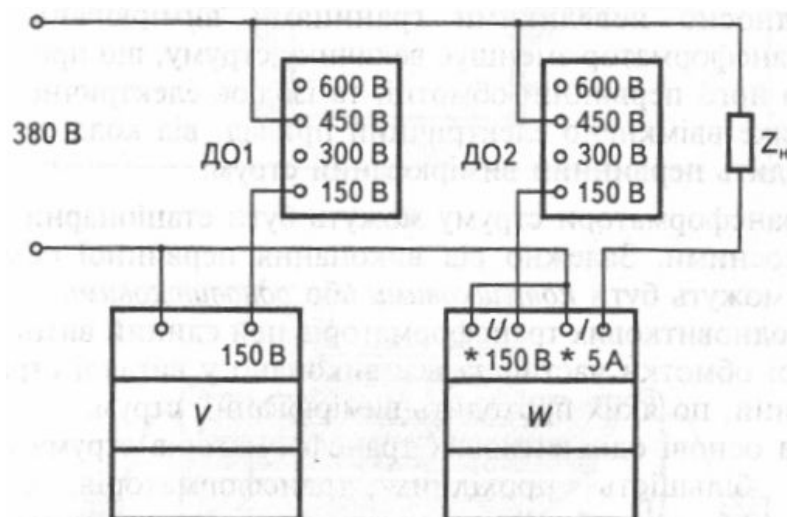


Рис. 6.4. Схема вмикання приладів з додатковими опорами

При використанні додаткових опорів вкрай необхідно, щоб величина номінального струму кола напруги приладу точно збігалася з величиною номінального струму додаткового опору, а номінальна напруга приладу — зі значенням напруги, вказаним на першому затискачі додаткового опору.

Зазначимо, що додаткові опори, призначені для вмикання з магнітоелектричними приладами, працюють як і прилади, тільки на постійному струмі.

Додаткові опори, призначені до роботи з електромагнітними та електродинамічними приладами, можуть працювати як на постійному, так і на змінному струмах.

6.3. Вимірювальні трансформатори струму

• **Вимірювальний трансформатор струму** — це знижувальний електричний трансформатор, що дає змогу вимірювати струм у колах зі значними струмами та з високою напругою за допомогою електричних приладів з відносно невеликими границями вимірювань. Цей трансформатор зменшує величину струму, що проходить по його первинній обмотці, та ізолює електричне коло, у яке ввімкнено електричний прилад, від кола, де проходить первинний вимірюваний струм.

Трансформатори струму можуть бути стаціонарними чи переносними. Залежно від виконання первинної обмотки вони можуть бути *катушковими* або *одновитковими*.

У одновиткових трансформаторів цей єдиний виток первинної обмотки частіш за все виконано у вигляді стрижня чи шини, по яких проходить вимірюваний струм.

На основі одновиткових трансформаторів струму виконано більшість прохідних трансформаторів струму ;

(рис. 17.5, а), які встановлюють в місцях уведення лінії І енергопостачання у будівлі, чи в місцях переходу лінії з одного помешкання в інше.

Прохідні трансформатори можуть мати й декілька витків первинної обмотки. Тоді їх виконують так, як показано на рис. 17.5, б.

Для роботи у мережах надвисоких напруг (200...500 кВ) виробляють дво- і кількакаскадні трансформатори струму. Будову і схему з'єднань одного з таких трансформаторів, розрахованого на експлуатацію в мережах напругою 220 кВ, показано на рис. 17.6.

Вторинна обмотка трансформатора струму у більшості випадків розрахована на номінальний струм 5 А. Саме такий струм має проходити по струмових обмотках вимірювальних приладів, якщо у первинній обмотці трансформатора він дорівнюватиме номінальному.

Для виконання вимірювань струму на відкритих трансформаторних підстанціях, де довжина проводів, що з'єднують вторинну обмотку трансформатора з вимірювальними приладами, може бути досить великою (іноді сотні метрів)

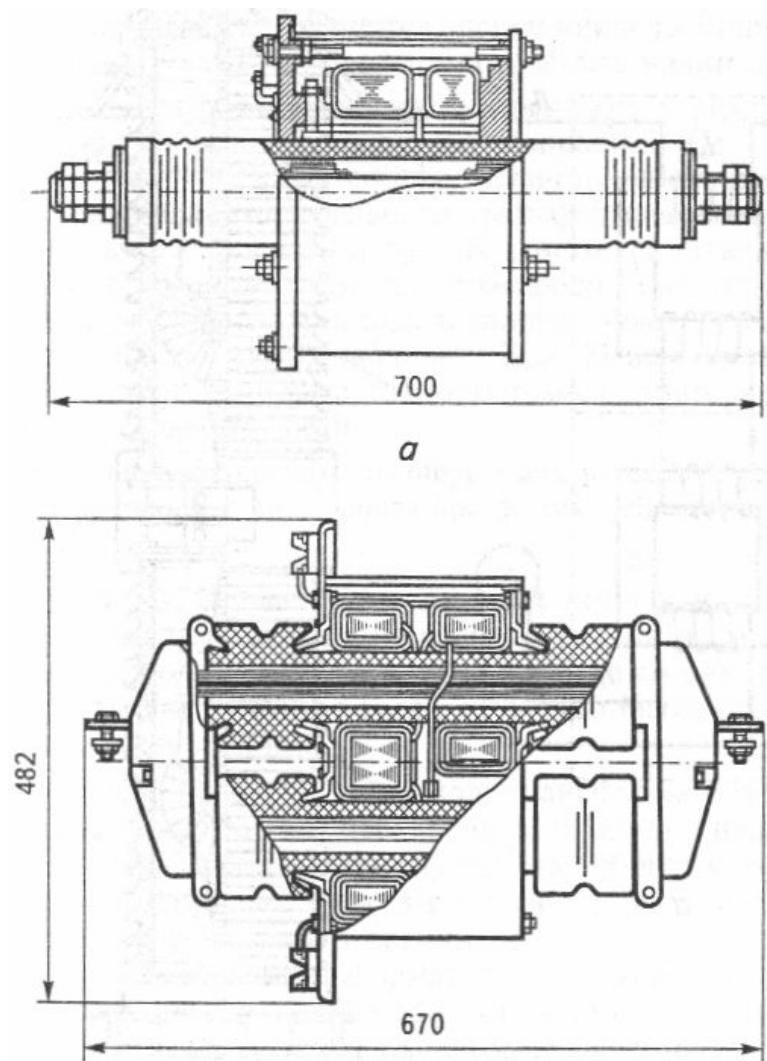


Рис. 6.5. Прохідні вимірювальні трансформатори струму

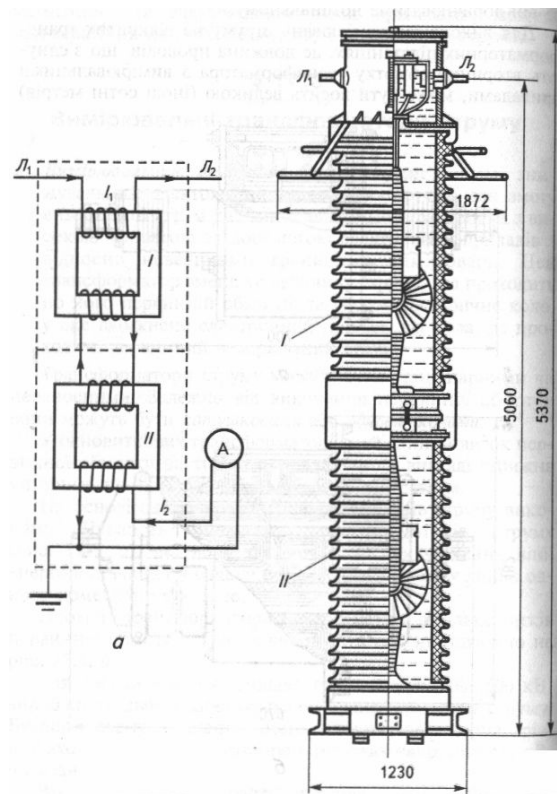


Рис. 6.6. Каскадний трансформатор струму:
а — схема; б — будова

виготовляють трансформатори струму з номінальним струмом вторинної обмотки, який дорівнює 1 А. Це необхідно для того, щоб не виконувати з'єднання цих трансформаторів з приладами проводами значного перерізу.

Всі трансформатори струму розраховано на те, що їхні вторинні обмотки будуть замкнені на амперметри, чи струмові обмотки ватметрів, лічильників та інших приладів, що мають, як і амперметр, досить малий опір.

Тобто трансформатори струму працюють у режимі, наближеному до режиму короткого замикання. Це і є нормальним режимом їхньої роботи. Величина опору, позначена на табличці вимірювального трансформатора струму, — це найбільша величина опору всіх обмоток приладів, приєднаних до вторинної обмотки трансформатора, при якому клас точності трансформатора відповідає тому класові, що вказаний на тій самій табличці. При більшому ж опорі з'явиться похибка, і клас точності трансформатора струму вже не буде гарантований.

Найбільш небезпечним і недопустимим режимом трансформатора струму є його робота при розімкнути вторинній обмотці.

При цьому збільшиться магнітний потік у магнітопроводі трансформатора, а на розімкнутих кінцях його вторинного кола з'явиться напруга у кілька сотень, а за несприятливих умов — і тисяч вольт, що являє собою небезпеку для людини.

Тому, якщо у вторинному колі трансформатора струму необхідно зробити які-небудь перемикання, наприклад замінити прилад, його вторинну обмотку обов'язково попередньо необхідно замкнути, а розімкнути лише після того, як прилад буде замінено і приєднано.

Схему вмикання трансформатора для вимірювань струму наведено на рис. 17.7, а. Порядок дій, необхідних при заміні приладу у вторинному колі трансформатора струму, показано на рис. 17.7, б.

Для того щоб уникнути небезпечного переходу високої напруги з первинної обмотки на вторинну в разі електричного пробоя ізоляції між обмотками, вторинну обмотку необхідно заземлити.

Для оперативних вимірювань струму у місцях, де немає ані трансформаторів струму, ані встановлених приладів (вимірювальних), найзручніше користуватись трансформаторними кліщами, які складаються з трансформатора струму з роз'ємним магнітопроводом, вимірювального приладу приєднаного до вторинної обмотки цього трансформатора, механізму роз'єму магнітопровода та ізоляційної ручки.

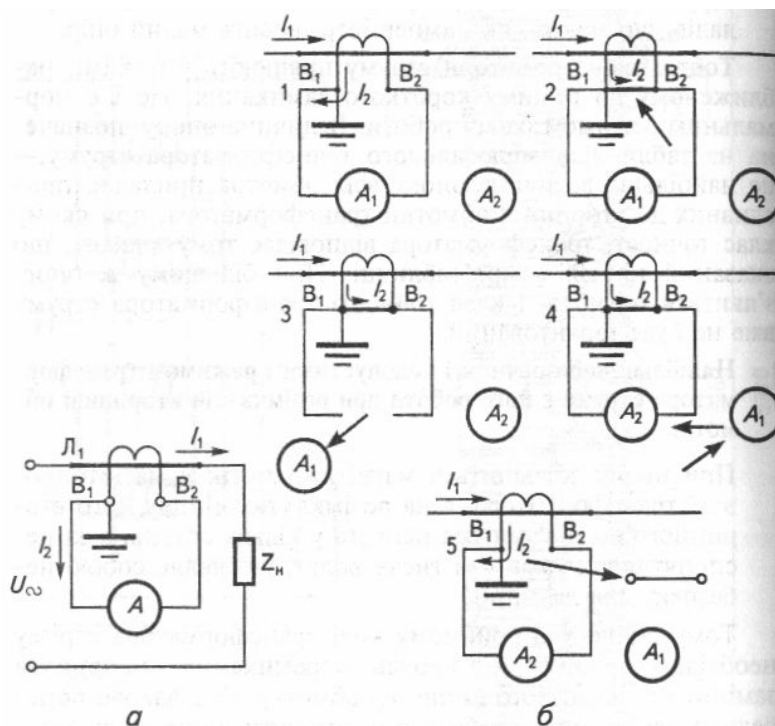


Рис. 6.7.

Схема вмикання вимірювального трансформатора струму: а — схема вмикання для вимірювань; б — порядок дій при заміні амперметра у вторинному колі трансформатора

Кліщі використовують при напрузі на струмопровідному проводі, що не перевищує 500...600 В. Але бувають кліщі з довгими ізольованими ручками, придатні для вимірювань струму й при напругах до 10 000 В.

6.4. Вимірювальні трансформатори напруги

• **Вимірювальний трансформатор напруги** — це знижувальний електричний трансформатор, що дає змогу вимірювати напругу в мережах зі значною напругою за допомогою електричних приладів з відносно невеликими границями вимірювань.

Цей трансформатор зменшує величину напруги до безпечного рівня та ізолює електричну мережу, до якої приєднано первинну обмотку, від електричного кола, в

яке ввімкнено вимірювальні прилади або їхні окремі кола (наприклад, кола напруги ватметрів, лічильників, фазометрів тощо).

У трансформаторах напруги і первинна, і вторинна обмотки мають значну кількість витків. У первинній кількості витків більша, ніж у вторинній, у стільки разів, у скільки разів напруга первинної обмотки більша за 100 В, бо номінальною напругою вторинної обмотки всіх трансформаторів напруги є саме 100 В. У багатьох таких трансформаторах вторинна обмотка має ще проміжний вивід, де напруга дорівнює $100/\sqrt{3}$ В.

Трансформатори напруги працюють у режимі, близькому до режиму холостого ходу, і величина опору, приєднаного до його вторинної обмотки, повинна бути не меншою за величину, при якій споживана від вторинної обмотки трансформатора потужність (при напрузі 100 В) не перевищує номінальної потужності трансформатора, позначеної на його табличці. Схему ввімкнення вимірювального трансформатора напруги з приладом для вимірювання напруги наведено на рис. 17.8.

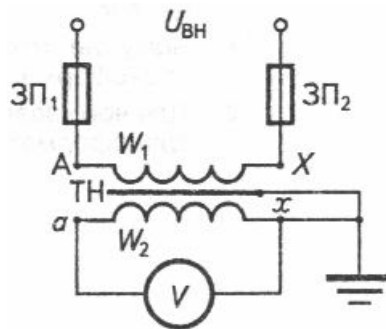


Рис. 6.8. Схема ввімкнення вимірювального трансформатора напруги

Запобіжники ЗП₁ і ЗП₂ для захисту трансформатора вкрай необхідні, бо в разі випадкового короткого замикання вторинної обмотки W₂, якби не було запобіжників, обов'язково б перегрілися й вийшли з ладу обмотки трансформатора, розраховані на дуже малий струм, споживаний цим трансформатором.

Для запобігання небезпечному переходові високої напруги з первинної обмотки на вторинну, в разі пошкодження ізоляції між ними, як і у трансформатора струму, вторинна обмотка трансформатора напруги потребує заземлення.

Контрольні запитання:

1. Які пристрої використовують для розширення границь вимірювання електровимірювальних приладів на постійному струмі?
2. Які пристрої використовують для розширення границь вимірювання електровимірювальних приладів на змінному струмі?
3. Що таке шунт та як до нього приєднують вимірювальний прилад?
4. Що таке "внутрішні шунти" та з якими приладами їх застосовують?
5. На які номінальні струми виготовляють шунти?
6. Для чого використовують калібровані проводи?
7. Для чого застосовують додаткові резистори?
8. Як приєднати додатковий резистор до ватметра?

9. Для чого застосовують вимірювальні трансформатори струму?
10. Для чого застосовують вимірювальні трансформатори напруги?
11. Чому не можна розмикати коло вторинної обмотки трансформатора струму?
12. Для чого заземлюють вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги?

ЛЕКЦІЯ 7 ПОТЕНЦІОМЕТРИ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ

Потенціометри забезпечують найбільшу точність вимірювань, що необхідна при практичних вимірах в умовах виробництва. Тільки за їх допомогою можна вимірювати ЕРС, напруги, струми і опори при повірках зразкових мір і вимірювальних приладів.

Цими засобами вимірювання можна забезпечити можливість виміру електричних величин з похибкою, не більшою за 0,05...0,02 %, тоді як вимірювальні прилади можуть забезпечити похибку вимірювань лише 0,1...0,2 % (а для вимірювань величин опорів й ще більшу). При цьому вказані похибки можуть бути далеко не для всіх розмірів електричних величин. Так, прилади, що забезпечують такі величини похибки, складно виконати для вимірювань напруг, менших за 3...15 В, а опорів — менших за 10...50 Ом.

На відміну від усіх відомих електровимірювальних приладів величини електричних напруг (до 1...1.2 В) точно вимірюють потенціометрами зовсім без споживання струму та потужності від джерела вимірюваної напруги, тобто не змінюючи режим роботи джерела. Це створює умови для проведення за допомогою потенціометрів наукових досліджень у галузях, далеких від енергетики, наприклад у біології.

7.1. Потенціометри постійного струму

- **Потенціометр** — це прилад для визначення величин електрорушійних сил, напруг, струмів та опорів компенсаційним методом. Використовуючи потенціометр у сукупності з мірами опору чи вимірювальними перетворювачами, можна вимірювати потужність, температуру, тиск тощо.

Електрорушійна сила чи напруга вимірюються потенціометром без споживання струму. Це можливо тому, що вимірювана потенціометром напруга врівноважується відомою напругою потенціометра, створеною проходженням точно відомого струму по точно відомому опору. Якщо ж струм у гальванометрі, який контролює наявність (чи відсутність) різниці напруг, відсутній, то роблять висновок, що вимірювана напруга і напруга потенціометра рівні між собою.

Принципову схему **потенціометра постійного струму** показано на рис. 7.1.

Потенціометр, схема якого обведена штриховою лінією, потребує приєднання до нього, окрім вимірюваної напруги U_x , ще й акумуляторної батареї АБ, нормального елемента НЕ та гальванометра Г.

Принцип дії потенціометра полягає в тому, що вимірювана напруга U_x , величина якої ще не відома, порівнюється з падінням напруги U_{II} , викликаної проходженням відомого робочого струму потенціометра I_P по частинах опорів r_1 і r_2 , величини яких точно відомі. Величини частин цих опорів на потенціометрі оператор виставляє, керуючись показами гальванометра Г, прагнучи одержати найменше відхилення його покажчика від нульової позначки.

Величина вимірюваної напруги зчитується за цифрами, що відповідають положенням рухомих перемикачів П1 і П2, бо потенціометр є дводекадним.

Залежно від класу точності потенціометра, число декад опорів (що відповідає числу наявних перемикачів) сягає чотирьох-п'яти.

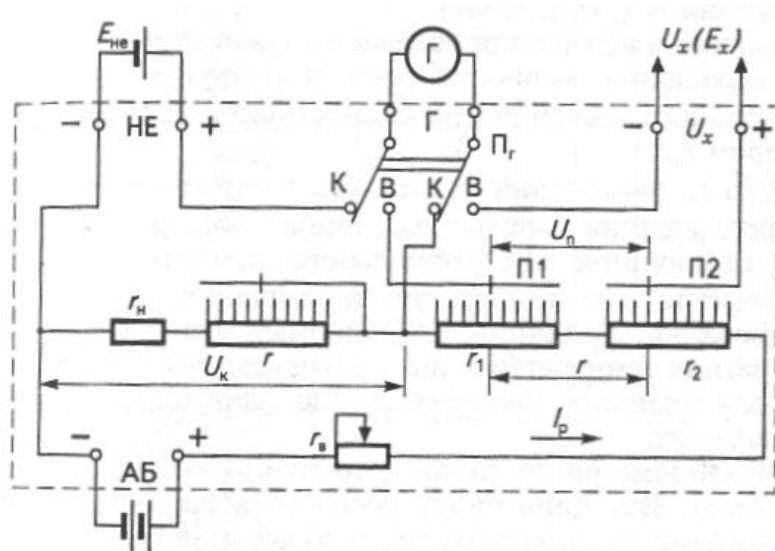


Рис.7.1. Принципова схема потенціометра постійного струму

Величина робочого струму I_p у більшості потенціометрів дорівнює 0,1 чи 1,0 мА. У потенціометрів, розрахованих на вимір ЕРС термопар, цей струм може бути дещо більшим. Така мала величина робочого струму в потенціометрах дає змогу, точно встановивши його номінальну величину резистором r_B ще до початку вимірювань, протягом тривалого часу його не коригувати, бо акумуляторна батарея АБ, від якої живиться коло робочого струму потенціометра, здатна працювати при номінальних струмах, у тисячі разів більших за струм I_p , і протягом тривалого часу (іноді кількох годин) не буде змінювати величини своєї ЕРС.

Для контролю за величиною робочого струму в робочому колі потенціометра є постійний резистор r_H і регульований, ступінчасте змінюваний (якщо це треба), резистор r_B . Величина падіння напруги на цих резисторах (при номінальному значенні робочого струму I_p) точно дорівнює ЕРС нормального елемента НЕ. Про рівність E_{HE} і U_K свідчитиме відсутність відхилення показчика гальванометра після перемикавання його перемикачем Π_r з положення В ("вимір") у положення К ("контроль").

Наявність відхилення показчика гальванометра свідчить про відхилення величини робочого струму I_p від свого номінального значення і необхідність його коригування резистором r_B .

Опір r_T ввімкнений послідовно з опором r_H , дає змогу узгодити падіння напруги від номінального робочого струму I_p з величиною ЕРС нормального елемента, яка є у цього елемента при температурі приміщення, де проходить вимірювання. Величини ЕРС нормального елемента при конкретних температурах його використання наведені у заводській технічній документації, що супроводжує нормальний елемент.

Потенціометри постійного струму бувають *великого* і *малого опору*. Величина опору робочого кола потенціометрів великого опору від кількох тисяч до десятків тисяч омів, робочі струми — 0,1 або 1,0 мА. Вони здатні вимірювати ЕРС і напруги величиною до 1,0...2,0 В.

Величини опору робочого кола потенціометрів малого опору від кількох десятків до кількох тисяч ом, а робочі струми — 1,0; 10 або 100 мА. Вони здатні вимірювати ЕРС і напруги величиною до 0,1 В.

Для вимірів більших значень ЕРС і напруг застосовують подільники напруги.

Потенціометри великого опору використовують для градуювання і повірки приладів з класами точності 0,1; 0,2 і 0,5 (для менш точних приладів доцільно користуватись зразковими приладами безпосереднього відліку).

(Потенціометри малого опору використовують головним чином для вимірювання ЕРС термопар.

Розглянута принципова схема (див. рис. 7.1) є істотно спрощеною і наведено її лише для пояснення принципу дії.

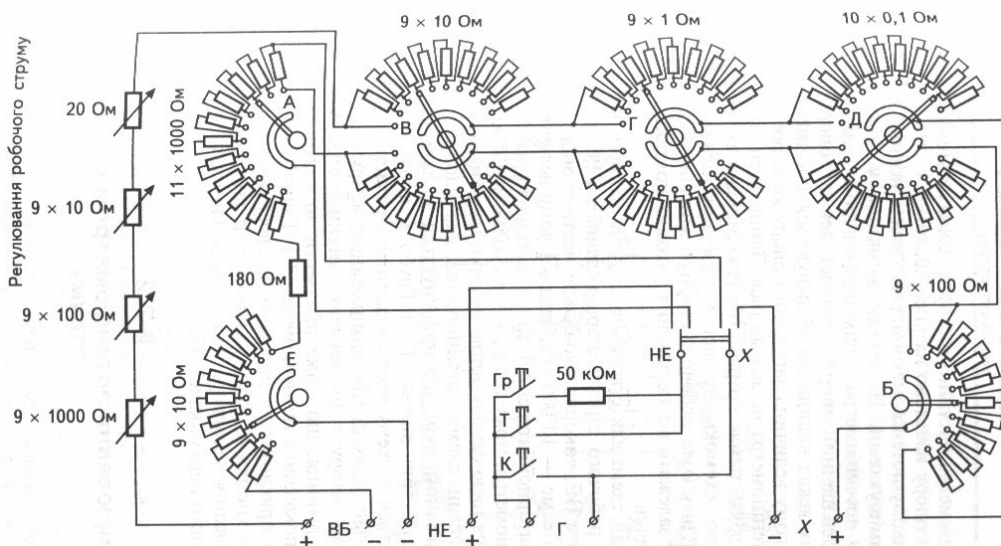


Рис. 7.2. Схема потенціометра великого опору

потенціометра постійного струму. Схему потенціометра великого опору наведено на рис. 7.2.

У цьому потенціометрі окрім п'яти основних декад є ще три заміщувальні. Ці декади ввімкнено у коло робочого струму потенціометра таким чином, що в разі зменшення (чи збільшення) опору основної декади опори заміщувальних декад відповідно збільшуються (чи зменшуються). При цьому величина загального опору кола робочого струму потенціометра не змінюється. Заміщувати опір першої і п'ятої декад немає потреби, бо їх ввімкнено за потенціометричною схемою, де всі опори цих декад назавжди ввімкнені у коло робочого струму і загальні опори цих декад не залежать від положення рухомих контактів їхніх перемикачів.

У цій схемі для створення падіння напруги від проходження робочого струму, порівнюваної з ЕРС нормального елемента HE, використано більшу частину опору першої декади, а саме — 10 000 Ом, завдяки чому величина напруги акумуляторної батареї AB, що живить коло робочого струму потенціометра, може бути на один вольт меншою, ніж у схемах, де з цієї самою метою використовують окремий опір.

У частині схеми потенціометра, яка відповідає керуванню гальванометром, що приєднується до затисків Г, передбачено три кнопки: Гр ("Грубо"), якою гальванометр вмикається у схему через додатковий резистор на початку вимірювання, коли між вимірюваною напругою або ЕРС і падінням напруги на декадах потенціометра може бути значна різниця, що може призвести до надмірного відхилення покажчика гальванометра; Т ("Точно"), якою гальванометр приєднується до схеми за своєї

найбільшої чутливості, й кнопка К, якою гальванометр замикається для заспокоювання коливань, що можуть виникати за відключення його перемикачем П.

7.2. Вимірювання потенціометром постійного струму

Потенціометри постійного струму придатні для точного вимірювання як напруги, так і струму та опору.

В умовах заводських лабораторій для таких вимірювань доцільно мати змонтовану на одному столі вимірювальну установку з потенціометром, регульованими резисторами та перемикачами, яка, в разі приєднання до неї джерел живлення, могла б використовуватися для вимірювань напруг, струмів та опорів за відповідних перемикачів. Таку схему наведено на рис. 7.3.

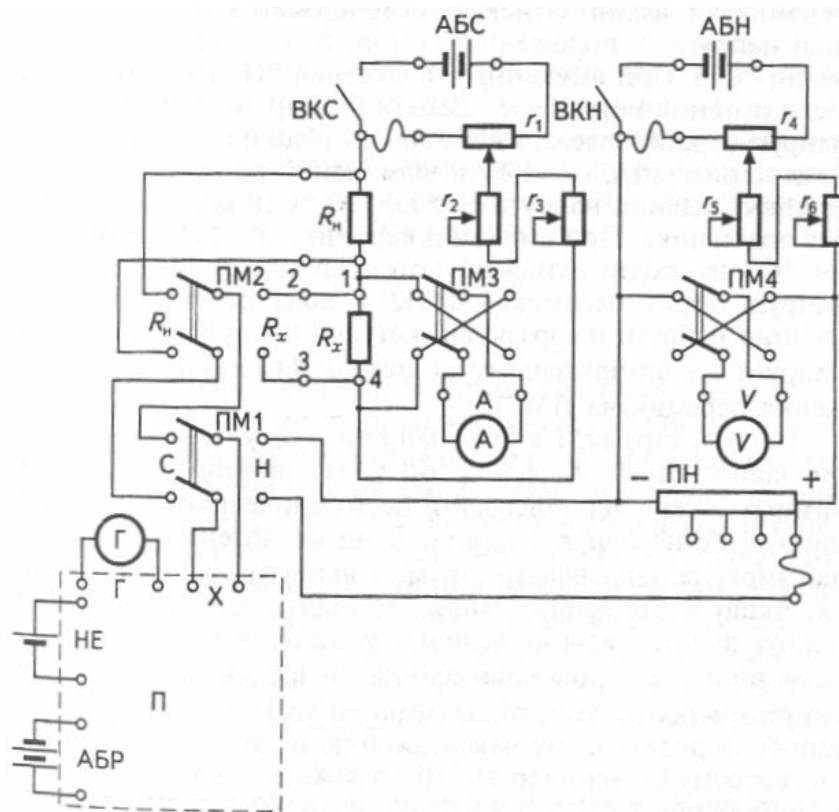


Рис. 7.3. Схема для вимірювання величин напруги, струму та опору потенціометром постійного струму

Головним елементом її є потенціометр П, до якого приєднано акумуляторну батарею живлення кола робочого Струму потенціометра АБР, нормальний елемент НЕ та гальванометр Г, що встановлено за межами столу: акумуляторна батарея — в сусідньому приміщенні, а нормальний елемент і гальванометр — на кронштейнах, укріплених на капітальній стіні, біля котрої розташовано установку.

Вхідні затискачі Х потенціометра П, до яких має бути приєднана напруга, безпосередньо вимірювана потенціометром, приєднано до перемикача ПМ1, що дає можливість перемикає вхідні затискачі потенціометра для вимірів у колі напруги (у положенні "Н") чи в колі струму (в положенні "С"). При вмиканні у положення "Н"

на вхідні затискачі потенціометра буде надходити напруга від подільника напруги, який, залежно від порядку величини напруги, що бажано виміряти, може бути ввімкнений на необхідний коефіцієнт ділення напруги (у 500, 100 та 10 разів) чи зовсім без подільника. При вмиканні перемикача ПМ1 у положення "С" на вхідні затискачі потенціометра буде надходити напруга через перемикач ПМ2 з кола струму. Це буде падіння напруги на зразковій котушці опору R_H чи падіння напруги на вимірюваному резисторі R_X (залежно від положення перемикача ПМ2).

І в колі струму, і в колі напруги є регульовані резистори, відповідно r_1, r_2, r_3 і r_4, r_5, r_6 , за допомогою яких при вимірах можна встановлювати необхідні величини струмів і напруг. Резистори r_1 і r_4 ввімкнено як потенціометри, що дає змогу встановлювати струми і напруги практично з нуля. Якщо ж для встановлення необхідних величин струмів і напруг досить наявних величин резисторів r_2, r_3, r_5 і r_6 , то резистори r_1 і r_4 доцільно відімкнути від джерел живлення гнучкими проводами, вказаними хвилястими лініями, щоб запобігти додатковому навантаженню на джерела живлення кола струму і кола напруги. Ці кола живляться від акумуляторних батарей АБС та АБН, що розташовані у сусідньому приміщенні. У багатьох випадках акумуляторну батарею АБН, що живить коло напруги, доцільно замінити електронним стабілізованим джерелом живлення, щоб не встановлювати акумуляторну батарею на величину напруги 160...300 В (а то й ще вишу).

Для забезпечення можливості проведення на цій установці перевірки амперметрів і вольтметрів електродинамічної або феродинамічної системи, яку бажано виконувати за різних полярностей струмів і напруг, що прикладені до приладів, у схемі передбачено перемикачі полярності ПМ3 (у колі струму) і ПМ4 (у колі напруги).

Якщо цю схему використовують для перевірки амперметрів чи міліамперметрів, то перемикач ПМ1 необхідно встановити у положення "С", перемикач ПМ2 — у положення " R_H ", перемикач ПМ3 — у положення бажаної полярності (між затискачами 1 і 4 не повинно бути нічого ввімкнено!).

Амперметр приєднують до затискачів "А". Далі, після вмикання вимикача кола струму ВКС, резисторами r_1, r_2 і r_3 встановлюють показчик амперметра на потрібну позначку шкали і потенціометром П вимірюють напругу на зразковій котушці опору, з якого розраховують величину струму (у амперах), що проходить через амперметр:

$$I \approx \frac{U_P}{R_H},$$

де U_P — величина напруги, виміряна потенціометром В;

R_H — величина опору зразкової котушки, Ом.

Якщо схему, котра розглядається, використовують для перевірки вольтметрів, то перемикач ПМ1 необхідно встановити у положення "Н", на подільнику напруги ПН встановити бажаний коефіцієнт поділення напруги, виходячи з того, що потенціометр П здатний вимірювати напругу не більшу за ту, що вказана в його технічному описі й що показують цифри його лімбів (ручок перемикачів). Далі випробуваний вольтметр приєднують до відповідних затискачів В і встановлюють перемикач ПМ4 у положення бажаної полярності.

Після вмикання вимикача кола напруги ВКН, резисторами r_4, r_5 і r_6 встановлюють показчик вольтметра на потрібну позначку шкали і потенціометром П вимірюють напругу, що надходить до нього від подільника напруги ПН. Далі розраховують величину напруги, що є на вольтметрі (у вольтах), помноживши величину напруги, виміряної потенціометром П, на коефіцієнт поділення напруги подільником ПН:

$$U = U_{\Pi} K_{\Pi\Pi}$$

де U_{Π} — величина напруги, виміряна потенціометром В;

$K_{\Pi\Pi}$ — коефіцієнт поділення напруги подільником ПН.

Якщо схему рис. 7.3 використовують для вимірювань невідомої величини опору, то цей опір R_x приєднують до затискачів 1—2—3—4 (перемикач ПМЗ необхідно виставити у нейтральне положення!), на лімбах потенціометра виставляють величину напруги 1 В (чи 0,1 В), вмикають вимикач кола струму ВКС і резисторами r_1 , r_2 і r_3 , встановлюють у колі струму таку величину струму, за якої величина падіння напруги на зразковій котушці R_H відповідала б величині напруги, встановленої на лімбах потенціометра П. Не торкаючись резисторів r_1 , r_2 і r_3 , перемикач ПМ2 переставляють у положення " R_x " і потенціометром П вимірюють падіння напруги на резисторі R_x . Величину опору R_x (у омах) розраховують з виразу

$$R_x = R_H \frac{U_{\Pi 2}}{U_{\Pi 1}},$$

де R_H — величина опору зразкової котушки, Ом;

$U_{\Pi 1}$ — величина напруги на R_H при встановленні струму (1,0 чи 0,1 В);

$U_{\Pi 2}$ — величина напруги на R_x , виміряна потенціометром, В.

7.3. Потенціометри змінного струму

Потенціометр змінного струму використовують для точного вимірювання напруг змінного струму компенсаційним методом, тобто шляхом врівноваження вимірюваної напруги рівною їй і відомою напругою потенціометра, рівною за частотою, але протилежною за фазою.

Таким чином, до врівноважувальної напруги потенціометра ставляться такі умови: вона повинна регулюватись як за величиною амплітуди, так і за величиною зсуву фаз, мати ту саму частоту, що й вимірювана напруга, мати ту саму форму напруги, що й у вимірюваної.

Як і в схемах з потенціометрами постійного струму. | показником рівноваги у схемах з потенціометрами змінного струму в більшості випадків використовують гальванометри, але змінного струму — вібраційні. Хоча при роботі таких потенціометрів у колах підвищеної частоти використовують електронні нуль-індикатори чи телефон.

В Україні, як і в усіх країнах СНД, широко застосовують прямокутно-координатні потенціометри змінного струму.

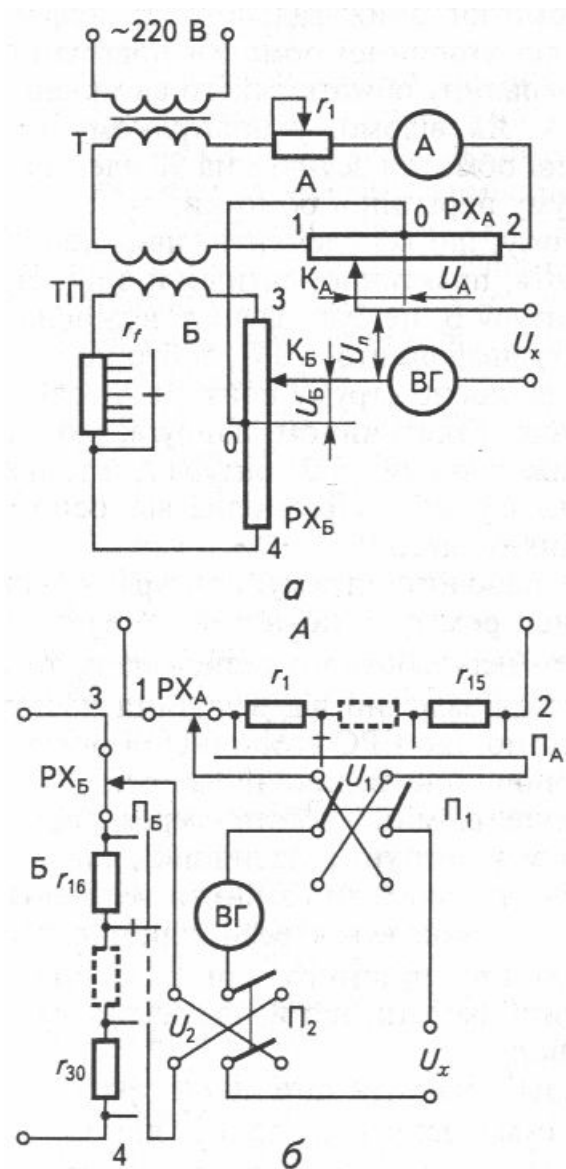


Рис. 7.4. Схема потенціометра змінного струму:
 а — принципова схема; б — схема ступінчастого перемикання опорів

Принципову схему такого потенціометра наведено на рис. 7.4, а. Для проведення вимірів на такому потенціометрі беззаперечно необхідно, щоб коло вимірюваної напруги і сам потенціометр жилися від одного і того самого джерела живлення, найчастіше — від мережі змінного струму. Потенціометр має два контури А і Б: контур А живиться від вторинної обмотки знижувального трансформатора Т, а контур Б — від вторинної обмотки повітряного трансформатора ТП, первинну обмотку якого ввімкнено у коло струму контура А. Як відомо, у повітряному трансформаторі ЕРС вторинної обмотки зсунуто на 90 електричних градусів відносно струму первинної обмотки.

Завдяки тому, що всі елементи, приєднані до вторинної обмотки, мають, практично, активний опір, струм, що проходить по контуру Б, не буде зсунуто відносно ЕРС вторинної обмотки трансформатора ТП, тобто цей струм буде зсунуто по фазі відносно струму контура А точно на 90 електричних градусів. Таким чином,

напруга, що є на реохордах, ввімкнутих між точками 1 і 2 контура А, і точками 3 і 4 контура Б, будуть зсунуті по фазі одна відносно іншої на ті ж 90 електричних градусів.

Величина робочого струму контура А встановлюється змінним резистором r_1 за показами амперметра А. Стосовно ступінчасто-регульованого резистора r_f , то його величина виставляється залежно від величини частоти напруги в мережі, бо відомо, що ЕРС вторинної обмотки трансформатора ТП пропорційна величині частоти струму. Для того щоб при деякій відміні частоти мережі від номінального значення струм у контурі Б залишився таким самим, що й при частоті 50 Гц, необхідно змінити величину опору цього контура, що й виконується резистором r_f з перемикачем, кожне положення рухомого контакта якого відповідає певній величині частоти, що й позначено на лімбі перемикача цього опору.

Вимірювальна напруга потенціометра U_{II} формується як геометрична сума напруг U_A та U_B , які знімаються з реохордів PX_A і PX_B , і може змінюватись як за величиною, так і за фазою, залежно від положення рухомих контактів реохордів K_A і K_B . З'єднання середніх точок реохордів дає можливість надавати напрузі потенціометра U_{II} якої завгодно фази в усіх чотирьох квадрантах координатної площини. Перемішуючи рухомі контакти реохордів, підбирають таку напругу U_{II} , щоб вона за величиною і за фазою повністю компенсувала вимірювану напругу U_x . Про наявність повної компенсації вимірюваної напруги U_x напругою потенціометра U_{II} свідчить відсутність розмиття світлової лінії на шкалі вібраційного гальванометра ВГ.

Для одержання точного відліку складових напруги потенціометра одних реохордів часто буває недостатньо. Більш точний відлік можна одержати, якщо реохорд використовують лише як складову частину вимірювального опору потенціометра. Вимірювальні опори, складені зі значної кількості однакових, точно підігнаних, резисторів, ввімкнутих за схемою потенціометра, наведено на рис. 7.4, б. До місця з'єднання двох сусідніх резисторів можна приєднатись за допомогою перемикачів $П_A$ і $П_B$. Реохорди PX_A і PX_B на цій схемі мають опір, що дорівнює опору одного з резисторів потенціометра. Завдяки цьому, наприклад, за допомогою перемикачів $П_A$ і $П_B$, можна ступінчасто змінювати напруги U_1 і U_2 з величиною напруги кожного ступеня у 0,1 В, а за допомогою реохордів — безступінчасте змінювати напруги U_1 і U_2 у межах одного ступеня.

На відміну від схеми рис. 7.4, а, в цій схемі зміна фази напруги складових U_1 і U_2 на протилежну виконується перемиканням перемикачів $П_1$ і $П_2$.

Робота на потенціометрі змінного струму значно складніша, ніж на потенціометрі постійного. Якщо на потенціометрі постійного струму компенсація вимірюваної напруги виконується з одного разу, то на потенціометрі змінного струму — лише після багатьох послідовних переходів з компенсації по першій координаті до компенсації по Другій з поверненням до першої координати і т. д. До початку вимірювання змінної напруги потенціометром необхідно, при відсутності на потенціометрі напруги U_x , приєднати трансформатор Т до мережі, частотоміром виміряти частоту напруги мережі, виставити величину резистора r_f відповідно до виміряної частоти та встановити змінним резистором r_1 за амперметром величину струму, що відповідає номінальній величині для даного потенціометра (частіше вона становить 0,5 А).

Впевнившись, що величина напруги U_x не перевищує номінальної вимірюваної напруги потенціометра (а це, звичайно, 1...2 В), проводи приєднують від ділянки кола з вимірюваною напругою до затискачів U_x потенціометра за найменшої чутливості вібраційного гальванометра. Далі за наявності розмиття світлової лінії на шкалі гальванометра налаштовують гальванометр на найбільше розмиття цієї лінії. В

разі необхідності чутливість гальванометра збільшують наявним у нього резистором регулювання чутливості.

Маючи розмиття світлової лінії у межах шкали гальванометра, за допомогою одного з перемикачів P_1 чи P_2 намагаються зменшити величину розмиття лінії. Якщо це хоч трохи вдається, то зупиняються на найменшому можливому розмитті й переходять до компенсації вимірюваної напруги за другою координатою. Після чого знову досягають найменшого можливого розмиття і повертаються до компенсації по першій координаті, кожного разу збільшуючи чутливість вібраційного гальванометра, якщо розмиття зменшилося до розміру кількох товщин світлової лінії. Отже, переходячи з однієї координати на іншу, досягають найменшого розмиття світлової лінії за найбільшої чутливості вібраційного гальванометра.

Якщо ж від самого початку не вдається зменшити розміра розмиття на шкалі гальванометра, то перемикають один із перемикачів P_1 чи P_2 , змінюючи фазу компенсуючої напруги за координатою, що розглядається, на 180 електричних градусів і знову намагаються знайти положення перемикача P_A чи P_B , що відповідає мінімальному розмиттю світлової лінії на шкалі. Про неправильне вмикання перемикача P_1 або P_2 свідчить найменше розмиття при повній відсутності компенсуючої напруги за даної координати.

Крім напруг, потенціометрами можна вимірювати також величини струмів і опорів. Струми вимірюють на основі вимірювань падіння напруг на зразкових, обов'язково безреактивних, опорах.

Величини опорів визначають посереднім методом, з вимірюваних величин напруги на опорі та струму, що в ньому проходить. Це дає змогу точно визначати навіть величини нелінійних опорів, у яких величини опорів залежать від величин струмів, що проходять цими опорами. Ці потенціометри здатні вимірювати кут зсуву фаз вимірюваних напруг і струмів відносно фази робочого струму потенціометра. Втім зазначимо, що виміри, виконані за допомогою потенціометрів змінного струму, забезпечують меншу точність, ніж виміри за допомогою потенціометрів постійного струму. Це пояснюється тим, що робочі струми потенціометрів змінного струму контролюють за зразковими вимірювальними приладами класу 0,1; 0,2; 0,5, тоді як робочий струм потенціометра постійного струму контролюють за ЕРС нормального елемента, котра може відрізнятись від номінальної не більше ніж на 0,02 %.

Контрольні запитання:

1. Для чого застосовують потенціометри?
2. Які величини напруг вимірюють власне потенціометрами?
3. Як можна розширити границі вимірів напруг потенціометрами?
4. Чому вимірювання напруги потенціометром проходить без споживання струму з кола, де діє вимірювана напруга?
5. Як контролюють величину струму в робочому колі потенціометра постійного струму?
6. Як зберігається незмінність величини робочого струму потенціометра при зміні величин опорів у його робочому колі, необхідній у процесі компенсування вимірюваних напруг?
7. Яким чином у потенціометрах постійного струму величина робочого струму може підтримуватись незмінною при різних температурах, незважаючи на те, що ЕРС нормального елемента певною мірою залежить від температури навколо

нього?

8. Як вимірюють величини струму потенціометром постійного струму?

9. Як вимірюють величини опору потенціометром постійного струму?

10. У чому полягає основна відмінність потенціометрів змінного та постійного струму?

ЛЕКЦІЯ 8 АМПЕРМЕТРИ І ВОЛЬТМЕТРИ. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУМІВ І НАПРУГ

На виробництві найбільш поширеними приладами є *амперметри* і *вольтметри*, бо саме за їхньою допомогою можна одержати інформацію про стан електричних мереж та електричного обладнання приєднаного до цих мереж. Крім того, саме з показників амперметрів, що вимірюють струм електричних двигунів, можна оперативно визначити стан технологічного (неелектричного) обладнання — ступінь його завантаження та наявність несправності.

Саме за допомогою вимірювань напруг проводиться пошук пошкоджень в електричних мережах та в більшості електричних об'єктів. Тому, вольтметри є найбільш розповсюдженими вимірювальними приладами, що обслуговують обладнання як на електричних станціях, так і в мережах та на промислових підприємствах.

Однак цими приладами, особливо вольтметрами, треба користуватися дуже уважно, пам'ятаючи, що величина власного опору цих приладів (особливо вольтметрів) у деяких випадках може впливати на точність вимірювань, в окремих випадках, наприклад при пошуку несправностей у схемах, де є елементи зі значним опором, і зовсім спотворити результати вимірювань.

8.1. Амперметри, міліамперметри, мікроамперметри і гальванометри

• **Амперметри** — це прилади для вимірювання електричних струмів. Залежно від величини вимірюваного струму можуть бути дещо відмінними і їхні назви: *міліамперметр*, *мікроамперметр*.

Міліамперметр має границю вимірювань струму меншу, ніж один ампер, а *мікроамперметр* — навіть меншу за один міліампер.

Деякі прилади використовують і для вимірювання значних струмів — *кілоамперметри*. Слід зауважити, що у міліамперметрів і мікроамперметрів вимірювані струми справді протікають безпосередньо через прилади: у амперметрів — на значні струми, а у кілоамперметрів струм, що позначений на них, ніколи не протікає через коло приладу.

Для вимірювань цими приладами необхідне обладнання, яке б нормовано зменшувало вимірюваний струм до величини, прийнятної для самого вимірювального приладу. При вимірюванні змінного струму — це *вимірювальні трансформатори струму*, при вимірюванні постійного — це *вимірювальні шунти*.

Для вимірювання струму використовують також і *гальванометри*. Це високочутливі електровимірювальні прилади, призначені для вимірювання струмів дуже малої величини — десь від кількох мікроампер до 10^{-11} А.

Але основне призначення гальванометрів є все ж не вимірювання, а визначення режиму відсутності струму при нульових (зрівноважувальних) методах вимірювань у поїнціометричних і мостових схемах.

Амперметри можуть бути виконані на основі вимірювальних механізмів: • електромагнітної (найпростіші); • магнітоелектричної; • електродинамічної; • феродинамічної або теплової систем.

Електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні та теплові амперметри здатні вимірювати постійні та змінні струми. Магнітоелектричні ж амперметри використовують для вимірювання постійного струму.

Для вимірювань на змінному струмі ці прилади використовують з

напівпровідниковими випрямлячами, але клас точності вимірювань при цьому відносно невисокий (2,5...4,0).

Амперметр електромагнітної системи — це найпростіший і найнадійніший прилад, що може працювати як у колах постійного, так і змінного струму. Струмopовідною у нього є лише обмотка нерухокої котушки, що приєднана до затискачів приладу.

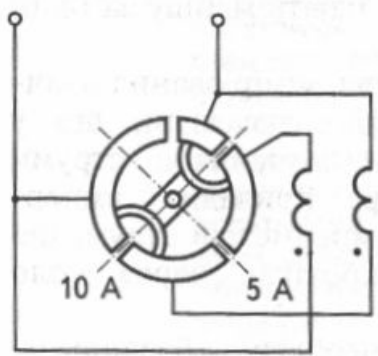


Рис. 8.1. Схема двограничного електромагнітного амперметра

Переносні електромагнітні амперметри у більшості випадків виконують на дві границі вимірювання. Це досягається відносно простим способом — намоткою котушки двома паралельними проводами і вмиканням цих двох секцій обмотки послідовно для вимірювання меншого струму і, паралельно, для вимірювання більшого струму. Границі вимірювання перемикають перемикачами. Схему амперметра з двома границями вимірювання на номінальні струми 5 і 10 А зображено на рис. 8.1.

Для розширення границь вимірювання, електромагнітні амперметри ніколи не використовують з шунтами, але ними часто користуються з трансформаторами струму.

Магнітоелектричні амперметри значно складніші й дорожчі за електромагнітні. У них обмотки рамок, що створюють обертовий момент у приладах, розраховані на струми лише у десятки — сотні міліампер, через наявність підводу до них струму через пружини, що мають дуже малу площу поперечного перерізу і нездатні пропускати більш значний струм.

Тому ці прилади завжди мають внутрішній шунт, що пропускає через себе більшу частину струму. Коло ж рамки вимірювального механізму тут використано як мілівольтметр, що вимірює падіння напруги на цьому шунті, пропорційне величині струму, який проходить через шунт. Шкалу такого приладу градуюють у амперах, якщо прилад має одну границю виміру. Але часто магнітоелектричні амперметри виготовляють з універсальними шунтами, придатними для користування з декількома границями вимірів. У цьому разі шкалу градуюють лише неіменованими поділками. Схему такого амперметра наведено на рис. 8.2.

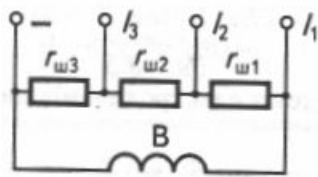


Рис. 8.2. Схема магнітоелектричного амперметра

У всіх магнітоелектричних амперметрах, послідовно з обмоткою рамки, ввімкнено резистор, виконаний з манганіну. Це суттєво зменшує похибку приладу, спричинену нагрівом обмотки рамки як протіканням власного струму, так і зміною температури довкілля.

Електродинамічні амперметри в основному використовують як зразкові електровимірювальні прилади. Виготовляють їх на основі електродинамічного вимірювального механізму. Вони однаково придатні як для вимірів на постійному, так і на змінному струмі. Ці прилади за будовою значно складніші за електромагнітні й споживають більшу потужність. Будову електродинамічного вимірювального механізму зображено на рис. 4.3, а принципову схему електродинамічного амперметра, розрахованого на дві границі вимірювання струму, на рис. 8.3. Перемикання границь вимірювання струмів в цій схемі виконується перемикачем.

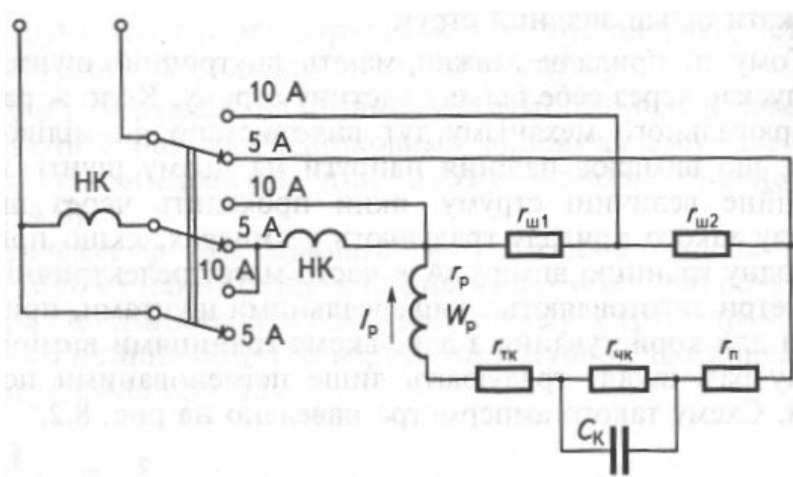


Рис. 8.3. Принципові схеми електродинамічного амперметра

Особливістю електродинамічного амперметра є те, що його рамка живиться через спіральні пружини, які створюють обертовий момент протидії, але неспроможні витримати скільки-небудь значний струм. Саме тому рамку приєднано до шунта, створеного резисторами $r_{ш1}$ і $r_{ш2}$, так що більша частина вимірюваного струму проходить через шунт (при вмиканні на більшу границю вимірювань — через резистор $r_{ш1}$, а при вмиканні на меншу границю вимірювань — через резистори $r_{ш1}$ і $r_{ш2}$), в рамку ж відгалужується лише частина вимірюваного струму, допустима по нагріванню як для обмотки рамки W_p , так і для спіральних пружин, що підводять до рамки струм. Послідовно з рамкою ввімкнено резистори $r_{чк}$ і $r_{тк}$, які виконано з манганінового проводу, що має дуже малий температурний коефіцієнт опору. Ці резистори зменшують залежність величини струму рамки I_p від зміни величини опору рамки r_p при її нагріві, незалежно від того, чим викликаний цей нагрів — чи зміною температури довкілля, чи проходженням через рамки струму I_p . Конденсатор C_k разом з резистором $r_{чк}$ є елементами частотної компенсації, яка забезпечує збіг показів амперметра при вимірах на постійному та змінному струмі.

Слід зауважити, що така проста схема компенсації похибки на змінному

струмі від наявної індуктивності рамки буває ефективною при вимірах у досить широкому діапазоні зміни величини частоти джерела змінного струму (від кількох десятків до кількох сотень герц).

Феродинамічні амперметри, як і електродинамічні, мають одну чи дві нерухомі обмотки, розташовані на феромагнітному осерді (як показано на рис. 4.4), і рухому обмотку-рамку, яка живиться через пружинки, не розраховані на проходження по них значних струмів. Тому за схемою феродинамічні амперметри не відрізняються від електродинамічних. Перевагою феродинамічних амперметрів є їхня значно менша споживана потужність, більший обертовий момент і пов'язана з цим більша надійність у роботі. Вони також краще захищені від впливу зовнішніх магнітних полів.

8.2. Вольтметри й мілівольтметри

• *Вольтметр* — це прилад для вимірювання ЕРС чи напруги в електричних колах. Він приєднується паралельно з устаткуванням, де бажано виміряти якусь з цих величин.

Вольтметри виконують на основі: • магнітоелектричних; • електродинамічних; • феродинамічних; • електромагнітних; • теплових; • електростатичних вимірювальних механізмів.

Магнітоелектричні вольтметри використовують для вимірів напруг постійного струму. *Електродинамічні та електростатичні вольтметри* можуть бути використані для вимірювань як на постійному, так і на змінному струмах. *Електромагнітні й феродинамічні вольтметри* при використанні відповідних матеріалів при їх виготовленні (наприклад, пермалою) та при відповідній технології обробки цих матеріалів також можуть бути використані як на постійному, так і на змінному струмах.

Обмотки вимірювальних механізмів вольтметрів магнітоелектричної, електродинамічної, феродинамічної та електромагнітної систем намагаються виконати з якомога більшою кількістю витків, щоб одержати відхилення покажчика вольтметра до кінцевої позначки шкали при можливо меншому значенні струму, споживаного обмоткою (чи обмотками) вимірювального механізму. Зменшення цього струму дасть змогу зменшити об'єм, масу і вартість приладу.

У всіх вольтметрів (за винятком електростатичних) послідовно з обмотками вимірювального механізму (а у теплових — послідовно з розжарюваним дротом) ввімкнено додатковий опір, виконаний у вигляді котушок чи пластин з обмоткою з тонкого проводу, що має великий питомий електричний опір та малий температурний коефіцієнт опору (це манганін чи константан). Цей додатковий опір змонтовано всередині корпусу вольтметра, поряд з вимірювальним механізмом, чи у частині об'єму корпусу, відокремленого від вимірювального механізму теплоізоляційною перегородкою для зменшення впливу тепла, що виділяється обмотками котушок чи пластин додаткового опору, на вимірювальний механізм.

Додаткові опори, які виконаю на пластинах, мають сприятливі умови для охолодження, тому їхня обмотка може бути виконана дротом меншого діаметра, ніж обмотка котушкового додаткового опору. При цьому витрата дроту . високого питомого опору буде значно меншою, ніж у котушкового додаткового опору. Це зменшує грошові витрати у виробництві таких опорів. Але ізоляційні пластини, що разом з накладеною на них обмоткою підлягають термічній обробці при температурах, близьких до 100 °С, часто розривають накладений на них з натягом дріт, через відмінні величини температурних коефіцієнтів лінійного розширення пластин і дроту. Через це котушкові додаткові опори слід визнати більш надійними і більш технологічними.

Стационарні вольтметри, які встановлюють на щитах і . пультах управління,

звичайно виготовляють кожний на одну певну величину номінальної напруги і градуюють безпосередньо в одиницях напруги (у вольтах). Якщо стаціонарні вольтметри призначені для використання з вимірювальними трансформаторами напруги, то їх виконують на напругу повного відхилення 100 В, але шкалу градуюють згідно з напругою первинної обмотки вимірювального трансформатора напруги (частіш за все — у кіловольтах). При цьому на шкалі приладу обов'язково роблять напис, де вказують, з яким трансформатором напруги необхідно користуватися цим вольтметром.

Якщо стаціонарний вольтметр призначено для вимірів з окремим зовнішнім додатковим опором, його також градуюють згідно з наявністю цього опору, а на шкалі робиться попереджувальний напис про вихідні дані цього додаткового опору.

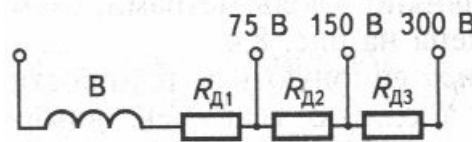


Рис. 8.4. Схема триграничного вольтметра

Переносні вольтметри у більшості випадків виготовляють на декілька границь вимірювання напруги. У цих вольтметрів є декілька внутрішніх додаткових опорів, що послідовно з'єднані як між собою, так і з обмоткою вимірювального механізму. Схему триграничного вольтметра, розрахованого на границі вимірювань 75...150...300 В, зображено на рис. 8.4. Зазначимо, що додаткові опори, зображені на схемі $R_{д1}$, $R_{д2}$ і $R_{д3}$, в дійсності можуть складатись із кількох котушок (кожний), одну з яких використовують для того, щоб можна було при виготовленні вольтметра підігнати величину загального опору приладу для кожної границі вимірювань до величини, вказаної на шкалі цього приладу.

Вольтметр перемикають для вимірювань при різних напругах шляхом приєднання одного провідника, що підводить напругу від місця вимірювання до відповідного затискача вольтметра.

Звичайно, для безпеки на час перемикання границь вимірів напруги контролюване цим вольтметром електричне коло необхідно вимкнути з мережі. Щоб кожного разу цього не робити, у багатьох випадках вольтметри виконують з важільними чи кнопковими перемикачами границь вимірювання.

Вольтметри з перемикачами можуть мати дещо складнішу схему. Наприклад, при перемиканнях границь виміру напруги виникає можливість не тільки змінювати величину додаткових опорів, а ще й перемикати з послідовного на паралельне з'єднання секції котушок вимірювального механізму електродинамічних і електромагнітних вольтметрів. Саме для цього котушки цих приладів заздалегідь намотують двома (а то й трьома) проводами паралельно. Такі схеми дають можливість суттєво зменшити потужність, споживану приладом при вимірах відносно високих напруг, порівняно з вольтметрами, схеми яких схожі на схему, що наведена на рис. 8.4.

Мілівольтметри виконують за найпростішими схемами і частіше за все з однією границею вимірювань напруги. Створюють їх на основі магнітоелектричних вимірювальних механізмів для вимірів на постійному струмі.

Мілівольтметри змінного струму виконують як електронні прилади (див. гл. 5).

8.3. Амперметри і вольтметри для кіл підвищеної частоти

Для вимірювання струму на підвищених частотах (до 8000...10000 Гц) придатні також електромагнітні прилади. В Україні виробляли такі стаціонарні прилади на 1000, 2500 і 8000 Гц. За наявності у них феромагнітних пелюстків рухомої частини з тонкого пермалою, термічне обробленого у вакуумі чи відновлювальному середовищі, та при градуванні їхніх шкал при струмі номінальної для них частоти, основна похибка цих приладів вкладається у межі, обумовлені їхнім класом точності (а це був клас 2,5).

Переносні амперметри електродинамічної системи також цілком придатні для вимірювань на підвищених частотах, але за наявності частотної компенсації, згідно з тим, як було розглянуто. Саме ці прилади використовують як зразкові при градуванні та повірках стаціонарних приладів і підвищеної частоти. Вибираючи зразковий прилад для вимірів на підвищеній частоті, слід орієнтуватися на позначення величини частоти на шкалі. Необхідно знати, що основна похибка приладу не повинна перевищувати значення, яке відповідає класу точності приладу лише на частоті чи у діапазоні частот, підкреслених рискою. Також треба враховувати, що при роботі приладу в діапазонах частот, позначених на шкалі, але не підкреслених (тобто у розширеному діапазоні частот), прилад може мати ще і додаткову похибку, що має не перевищувати величину похибки, зумовленої класом точності приладу. Тобто при роботі у розширеному діапазоні частот прилад може мати загальну величину похибки, вдвоє більшу за ту, що зумовлена класом точності приладу.

У колах змінного струму промислової та підвищеної частоти дуже часто застосовують *випрямні прилади*, що являють собою суміщення вимірювального механізму магнітоелектричної системи з напівпровідниковими випрямлячами. Ці прилади виконують комбінованими — здатними вимірювати, при відповідних переключеннях, ще й постійний струм і напругу.

Такі прилади, відомі під назвою "тестери", роблять ба-гатограничними, їх широко застосовують у налагоджувально-ремонтних роботах.

Принципові схеми випрямних приладів, що вимірюють напругу змінного струму за допомогою магнітоелектричних вимірювальних механізмів, зображено на рис. 8.5.

На цьому рисунку схема (а) забезпечує однопівперіодне випрямлення струму, а схема (б і в) — двопівперіодне. Однопівперіодне випрямлення було б можливим за наявності випрямляча В1, але при цьому випрямляч необхідно розрахувати на повне значення вимірюваної напруги, якщо вимірювальний механізм з випрямлячем буде застосовано у схемі вольтметра. Наявність другого (зустрічного) випрямляча В2 дає можливість використати обидва випрямлячі на величину напруги всього у кілька вольт. Додаткові опори гд розширюють границі вимірювання напруги.

Всім приладам з напівпровідниковими випрямлячами притаманні дві основні вади: залежність показів від величини температури та від величини частоти.

При підвищенні температури зменшуються величина опору напівпровідників та коефіцієнт випрямлення. При підвищенні частоти наявність ємності випрямлячів призводить до збільшення частки змінного струму, що, не випрямляючись, проходить повз запірний шар напівпровідника. Це зменшує коефіцієнт випрямлення (і показання приладу) зі збільшенням величини частоти.

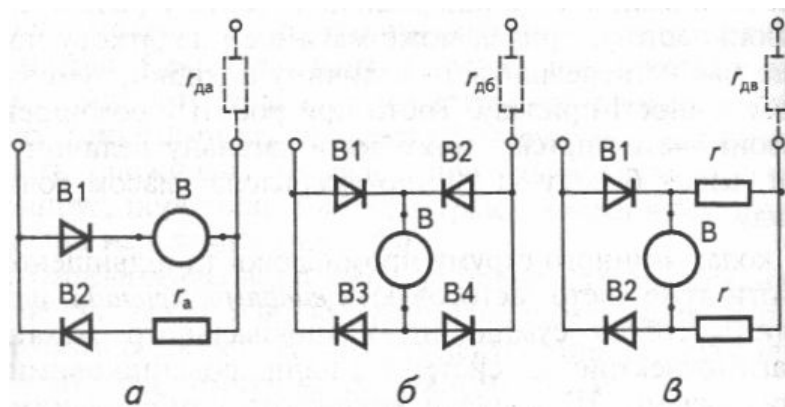


Рис. 8.5

Принципові схеми випрямних приладів: а — з однопівперіодним випрямлячем; б, в — з двопівперіодним випрямлячем

Є багато схем температурної та частотної компенсації похибок у випрямних приладах. Компенсація полягає у вмиканні дрітчастих резисторів, виконаних з мідного проводу, в ділянки кола приладу, де необхідне збільшення опору при підвищенні температури довкілля, та у вмиканні котушок індуктивностей у ділянки, де необхідне збільшення загального опору при підвищенні частоти.

Але у багатьох випадках при створенні випрямних вимірювальних приладів не вдаються до складних схем частотної компенсації, а обмежують діапазон робочих частот величиною, що досягає 1500...2500 Гц, якщо клас приладу на змінному струмі не перевищує 2,5...4,0.

8.4 Вимірювання струму

Величину електричного струму, що проходить через будь-яку ділянку електричного кола, вимірюють амперметром, який вмикається послідовно зі споживачем електричної енергії, що є на цій ділянці. Частина розгалуженого електричного кола з амперметрами, ввімкнутими в окремі його ділянки для виміру струмів, зображено на рис. 8.6. Амперметри А2 і А3 вимірюють струми, що проходять по кожній з двох паралельних гілок, амперметр А1 вимірює загальний струм, споживаний від джерела живлення. Якщо джерело живлення є джерелом постійного струму, то сума струмів, вимірюваних амперметрами А2 і А3, має дорівнювати (у межах точності вимірів) струмові, вимірюваному амперметром А1. Те ж саме має бути при живленні від джерела змінного струму, якщо всі резистори (R_1 , R_2 і R_3), застосовані у схемі, є активними. При наявності ж у схемі резисторів з реактивними чи змішаними опорами, величина струму, вимірюваного амперметром А, може бути як меншою за суму струмів, вимірюваних амперметрами А2 і А3, так, в окремих випадках, і дорівнювати їй.

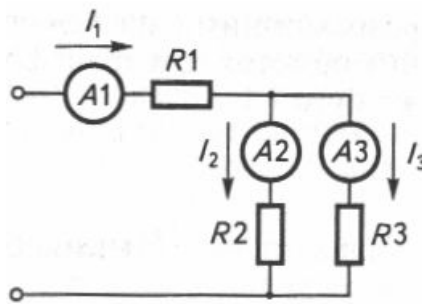


Рис. 8.6

Вимірювання струмів амперметрами

При вимірюваннях струмів у колах постійного струму можуть використовуватись магнітоелектричні, електродинамічні або теплові амперметри (міліамперметри). Феродинамічні та електромагнітні амперметри можна використовувати лише у тому разі, якщо на шкалах цих приладів позначено, що вони придатні для вимірів на постійному струмі.

Якщо ж такого позначення немає, то при користуванні такими приладами можуть бути більші похибки, ніж це передбачено класом точності приладів.

При вимірюваннях струмів у колах змінного струму можуть використовуватись електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні, теплові, термоелектричні або випрямні амперметри.

Магнітоелектричні амперметри зовсім непридатні для вимірів на змінному струмі, а їх помилкове вмикання в коло змінного струму може призвести лише до непорозуміння, бо відсутність відхилення їхніх показників від нульової позначки (навіть при значних величинах змінного струму, що проходить через них) може спонукати спостерігача до збільшення напруги (якщо спостерігач може це зробити), що призведе до пошкодження елементів схеми, чутливих до значних напруг і струмів.

Якщо величини струмів необхідно вимірювати у колах зі значними струмами, прямі вимірювання яких неможливі наявними амперметрами, то у колах постійного струму необхідно користуватися зовнішніми шунтами з приєднаними до них магнітоелектричними мілівольтметрами. У колах змінного струму користуються вимірювальними трансформаторами струму з електромагнітними, електродинамічними або феродинамічними амперметрами, розрахованими на величину номінального струму вторинних обмоток цих трансформаторів. Звичайно це 5 А, але може бути і 1 А.

8.5. Вимірювання напруги

Вимірювання напруги є чи не найбільш поширеним видом вимірювань на електричному обладнанні. У більшості випадків для вимірювань напруги змінного струму в промисловості користуються *електромагнітними вольтметрами*, як такими, що мають просту конструкцію, надійні при користуванні та найдешевші за вартістю серед вольтметрів інших систем сумірного класу точності.

У випадках, коли вимірювана напруга вища за 500...600 В, ці вольтметри використовують разом з вимірювальними трансформаторами напруги, здатними перетворювати змінну напругу номінальної для первинної обмотки трансформатора величини, у напругу 100 В, на яку розраховано вольтметри, призначені для роботи з цими трансформаторами. В цих випадках шкали вольтметрів градуують у значеннях

первинної (високої) напруги трансформатора. При цьому обов'язково повинен бути напис на шкалі про коефіцієнт трансформації необхідного вимірювального трансформатора напруги у вигляді дробу з номінальною первинною напругою його у чисельнику і номінальною напругою вторинної обмотки — у знаменнику.

Для вимірювань напруг змінного струму придатні й електродинамічні вольтметри, але в основному їх використовують як переносні прилади для перевірки інших вольтметрів.

Досить часто для вимірювань напруг змінного струму користуються випрямними вольтметрами, що являють собою вимірювальний механізм магнітоелектричної системи, зкомбінований з напівпровідниковими випрямлячами та з додатковим опором, суміщеними в одному корпусі.

Для вимірювання напруг постійного струму найдоцільніше користуватись магнітоелектричними вольтметрами, як такими, що потребують малої потужності живлення і мають значний обертовий момент вимірювального механізму, що зумовлює їх достатню надійність в експлуатації. На постійному струмі можна вимірювати напругу також приладами електродинамічної, електростатичної, електромагнітної і феродинамічної систем. У останніх двох випадках — якщо на їхніх шкалах є умовна позначка постійного струму.

В устаткуваннях, де є напруги змінного струму підвищеної чи високої частоти, можна користуватись вольтметрами електростатичної чи випрямної системи.

Напругу, що діє на будь-якій ділянці електричного кола, вимірюють вольтметрами, приєднаними паралельно з контрольованими ділянками. На схемі рис. 8.7 показано, як іреба вмикати вольтметри для вимірювання напруг на різних ділянках електричного кола. Величину напруги ме-Режі, чи якого іншого постачальника електричної енергії, вимірюють вольтметром $V1$, а величини напруг на опорах Резисторів $R1$ і $R2$ — вольтметрами $V2$ і $V3$.

При вимірюваннях у електричних колах зі значними величинами опорів необхідно враховувати, що приєднання вольтметра до будь-якої ділянки кола може суттєво змінити режим її роботи.

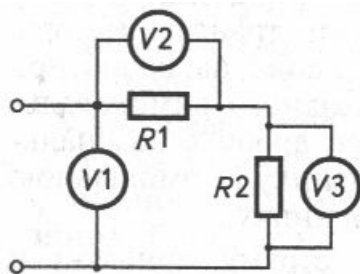


Рис. 8.7
Вимірювання напруг вольтметрами

В умовах виробництва, наприклад при пошуку пошкоджень у електричних колах, величини напруг на різних ділянках кола вимірюють одним вольтметром, який почергово приєднують до різних точок кола, як це показано на рис. 8.8. Щоб виміряти величину напруги джерела, вольтметр за допомогою щупів приєднують до точок A і D . Для вимірювання напруги на резисторі $R1$ — до точок A і B , на $R2$ — до точок B і C , на $R3$ — до точок C і D .

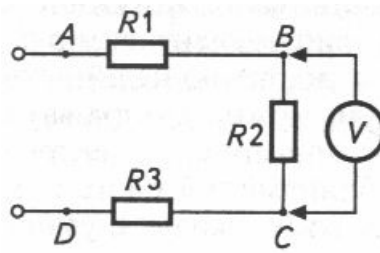


Рис. 8.8

Вимірювання одним вольтметром напруг на різних ділянках електричного кола

Якщо опори R_1 , R_2 і R_3 досить великі, а то й сумірні з власним опором вольтметра, то може статись, що сума напруг, вимірюваних на резисторах R_1 , R_2 і R_3 , буде значно меншою, ніж напруга мережі. Пояснюється це тим, що під час вимірювання напруги, коли вольтметр приєднано паралельно до якогось з резисторів, дійсна величина опору між точками приєднання щупів буде дещо меншою за величину опору відповідного резистора. При цьому буде меншим і загальний опір кола, що може призвести до збільшення величини струму в колі та величин падіння напруг на інших опорах, що є у колі (тих, на яких у даний момент величина напруги не вимірюється). Таким чином, на контрольованій ділянці величина напруги буде меншою за ту, що буде при відсутності вольтметра.

З цієї причини, наприклад при пошуку несправності в електронних схемах, недоцільно користуватися вольтметрами високих класів точності, що мають відносно невеликий опір. Доцільніше користуватись вольтметрами класу точності всього 2,5... 4,0, але з великим власним опором. Саме такими бувають магнітоелектричні вольтметри, що є основою багатограничних приладів — тестерів.

У цих приладів величина власного опору становить десь 8000...20000 Ом на один вольт (тобто струм повного відхилення покажчика вольтметра становить 125...50 мкА).

Тестери, звичайно, багатофункціональні вимірювальні прилади, але їхня основна функція — вимірювання напруги. Завдяки малій величині власного споживаного струму (як і споживаної потужності) ці прилади з додатковим опором, вмонтованим у щуп, що має підсилену ізоляцію, бувають здатні вимірювати напруги величиною до 25...30 кВ.

Але, користуючись вольтметром з великим внутрішнім опором при пошуку пошкоджень у мережах з напругою до 600 В, треба пам'ятати, що ці вольтметри можуть показувати напругу на окремих ділянках мережі там, де її насправді немає. Тобто напруга там є тільки для самого вольтметра, а для якогось споживача електричної енергії, що потребує значно більшої потужності, ніж цей вольтметр, напруги зовсім не буде. Це явище виникає через наявність між проводами мережі (рис. 8.9) витоку електричного струму через опір ізоляції R_{i1} , R_{i2} чи ємність C_1 , C_2 між проводами. Тут показано, яким чином вольтметр, приєднаний між пошкодженим (розірваним) і непошкодженим проводом, може показувати напругу.

Величина опору ізоляції нормована, і на більшості ділянок мереж промислових підприємств не повинна бути меншою ніж 0,5 МОм. Якщо зважити на те, що власний опір вольтметра, розрахованого на вимір напруги 600 В, може становити 12 МОм (якщо струм його повного відхилення становить 50 мкА), то можна встановити, що у найгіршому випадку опір ізоляції може становити лише 1/24

частину від власного опору вольтметра. Тобто вольтметр при такому приєднанні показуватиме майже повне значення напруги. Насправді він може показувати й дещо меншу частину повної напруги, якщо врахувати наявність опору ізоляції між третім провідником і пошкодженим. Але в обох випадках показання вольтметра буде суттєвим. Щоб запобігти такій похибці, досить скористатися для вимірів якимось іншим (наприклад, електромагнітним) вольтметром, у якого власний опір при границі виміру напруги 600 В буде становити всього приблизно 40 000 Ом. Тобто для цього вольтметра величина найменшого опору ізоляції буде вже майже у 12 разів більшою за його власний опір. Отже, при вмиканні такого вольтметра показчик ледь ворухнеться, що свідчитиме про відсутність напруги на пошкодженому проводі.

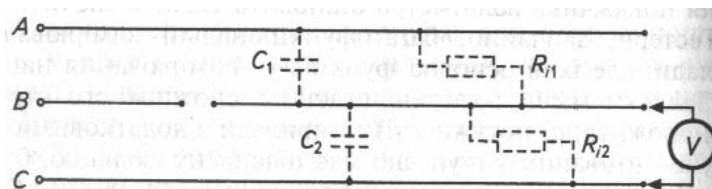


Рис.8.9. Схема, що пояснює можливість помилкового виміру напруги вольтметром при пошуку пошкоджень у мережах

Якщо ж для вимірів неможливо використати вольтметр з обмеженою величиною власного опору, то пошкоджену ділянку електричної мережі можна знайти за допомогою вольтметра з великим власним опором, приєднавши при вимірах паралельно йому резистор (чи кілька резисторів, увімкнених послідовно) з загальною величиною опору 40...50 кОм і потужністю 7...10 Вт.

Все сказане про пошук пошкодження за допомогою високоомного вольтметра можна цілком віднести й до застосування у подібних випадках електростатичних вольтметрів якими взагалі у таких випадках не бажано користуватися.

Контрольні запитання:

1. Яку фізичну величину вимірюють амперметром?
2. Яку фізичну величину вимірюють вольтметром?
3. Вимірювальні механізми яких систем використовують у амперметрах?
4. Вимірювальні механізми яких систем використовують у вольтметрах?
5. Амперметри якої системи є найпростішими і надійними для використання в енергетиці?
6. Які прилади використовують для вимірювання електричних струмів?
7. З яких матеріалів виконують додаткові резистори у вольтметрі?
8. Чому у вольтметрі обов'язково має бути внутрішній додатковий резистор?
9. Що являє собою випрямний вольтметр? З яких обов'язкових вузлів він складається?
10. Які прилади використовують із зовнішніми шунтами для вимірювання величини струму?
11. Чому вольтметри з дуже великим власним опором небажано застосовувати для визначення ділянки обриву проводу в електричній мережі?

ЛЕКЦІЯ 9 ВАТМЕТРИ. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

• **Ватметри** — це електровимірювальні прилади, призначені для вимірювання електричної потужності, їх застосовують на електричних станціях, щоб контролювати потужність, яку виробляє кожний генератор, а також вся електрична станція. Саме ватметри дають можливість персоналові станції найдоцільніше вести технологічний процес виробництва електроенергії кожним енергоблоком, що забезпечує найбільш раціональне використання палива, тобто найекономічнішу роботу всієї електростанції.

Застосування ватметрів при розподілі електричної енергії в електричних мережах дає змогу запобігти даремній циркуляції потужностей у неодноразово з'єднаних між собою мережах і зменшити в них втрати потужності.

Найбільш поширеними є *ватметри електродинамічної та феродинамічної систем.*

Їх виробляють як для прямого вмикання в мережу, якщо величина номінального струму, що проходить по їхніх струмових обмотках, становить одиниці чи кілька десятків ампер, так і для вмикання через вимірювальні трансформатори струму та напруги. При цьому шкали приладів градуюють у кіловатах чи мегаватах. Прилади ці називають кіловатметрами чи мегаватметрами, хоча насправді їхній власний номінальний струм у подібних випадках становить 5 А, а номінальна напруга — 100 В. Саме такими ватметрами переважно користуються на електричних станціях та у системах енергопостачання.

9.1. Ватметри. Вимірювання потужності на постійному і однофазному змінному струмі

У мережах постійного і в однофазних мережах змінного струмів найчастіше застосовують ватметри *електродинамічної системи*, більшість яких здатна працювати як на постійному, так і на змінному струмах. Хоча серед стаціонарних ватметрів, особливо тих, які призначено застосовувати з вимірювальними трансформаторами струму і напруги, є багато таких, що не призначені для використання на постійному струмі.

Щодо переносних приладів, то такі ватметри можуть завжди використовуватись як на постійному, так і на змінному струмах. Їх виробляють з класами точності 0,1; 0,2 і 0,5.

Ватметри перших двох класів зручно використовувати як при градуюванні, так і при перевірці стаціонарних ватметрів нижчих класів точності (1,5; 2,5; 4,0).

Схему стаціонарного ватметра відносно невисокого класу точності (2,5; 4,0) наведено на рис. 9.1. Цей ватметр має два роздільні електричні кола — коло струму (звичайно, це тільки обмотка нерухомої котушки W_1) і коло напруги, до якого входять рухома обмотка — рамка W_P та опори r_1 , r_1 r_3 . Що створюють додатковий опір. Цей опір забезпечує при вмиканні цього кола на номінальну напругу, вказану біля одного із затискачів цього кола, певну величину струму (номінального для кола напруги).

Зазначимо, що кола напруги в електродинамічних ватметрах розраховано на відносно великі (для подібних кіл) струми (наприклад, 30 мА чи ще більший). Це зумовлене тим, що струмова обмотка у таких ватметрів хоч і створює значну магніторушійну силу, але нездатна створити значної магнітної індукції всередині нерухомої котушки. Це пояснюється тим, що в електродинамічних приладах лінії магнітного поля на всій своїй довжині проходять у повітрі, яке створює значний магнітний опір їх проходженню. Через це прийнятну величину обертового моменту, що діє на рухома частину електродинамічного вимірювального механізму, можна одержати лише при значному струмі у рамці приладу.

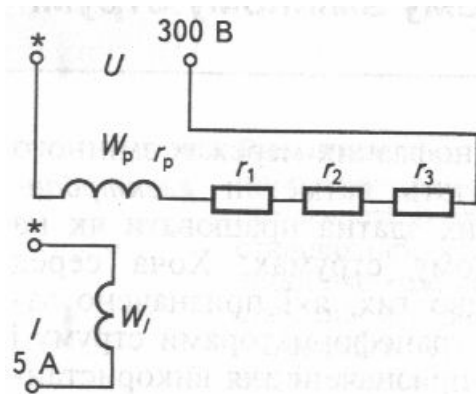


Рис. 9.1
Схема стаціонарного ватметра

Резистори r_1 , r_2 і r_3 , ввімкнуті в коло напруги, разом з опором обмотки-рамки r_p мають скласти певну величину опору кола напруги (в даному випадку — 10 000 Ом), яка б при номінальній величині напруги, прикладеної до цього кола, забезпечила протікання номінального струму обмотки-рамки (30 мА).

Опори r_1 , r_2 і r_3 виготовляють із манганінового дроту для одержання малої залежності величини опору кола як від температури довкілля, так і від підвищення температури всіх елементів кола, викликаного проходженням по них електричного струму. Тут манганін є найкращим матеріалом, бо має дуже малий температурний коефіцієнт опору. Досить сказати, що при зміні температури манганінового дроту на 10°C , його опір зміниться лише десь на 0,03% від своєї початкової величини.

У цьому колі все ж є елемент, електричний опір якого значною мірою залежить від коливань температури, — це опір обмотки рамки, намотаної мідним дротом, що при зміні температури на ті ж 10°C змінює величину опору аж на 4 % і порівняно з початковою величиною. Але якщо зважити на те що опір рамки становить у цьому колі лише невелику частку (десь біля відсотка), вплив зміни величини опору рамки майже невідчутний у загальному опорі кола. Таким чином, у цілому струм в обмотці рамки мало залежить від температури.

Разом з тим зміна температури повітря навколо приладу й всередині нього впливатиме на пружність спіральних пружин, які створюють момент протидії і підводять струм до обмотки-рамки. Для бронзових пружин зміна їх пружності при зміні температури повітря в середньому становить десь близько 1 % на 10°C (при підвищенні температури пружини слабнуть і показання приладу збільшуються). Якщо зважити на те, що згідно з державними стандартами додаткова похибка від зміни температури на $\pm 10^\circ\text{C}$ відносно номінальних 20°C може досягати величини, що відповідає класові точності (а клас точності стаціонарного ватметра 2,5), то ніяких заходів щодо зменшення цієї додаткової похибки не передбачено.

У випадках, коли ватметр має вищий клас точності, наприклад 0,5 чи 0,2, поява такої додаткової похибки неприпустима. Тому у більш точних приладів, наприклад у переносних електродинамічних ватметрах класу 0,2, застосовано досконалішу схему, яку наведено на рис. 9.2. Ця схема більш досконала ще й тим, що в ній ужито заходів для створення можливості застосування приладу як на постійному, так і на змінному струмі. Крім того, в цьому приладі передбачено можливість працювати на одній з

двох номінальних напруг (150 чи 300 В) і на одному з двох номінальних струмів (2,5 або 5 А).

Наявність конденсатора C , паралельного резисторові r_1 , дає можливість налаштувати коло рамки на безреактивність, тобто практично компенсувати індуктивність рамки L_p ємністю C . Це буде можливо, якщо $L_p \ll C r_1^2$. При такій компенсації опір кола між точками a і b не матиме реактивної складової, тобто буде практично активним. Це можливо не тільки при величині частоти 50 Гц, але й у значному діапазоні зміни частот, хоч до 500...1000 Гц, поки величина $4\pi^2 f^2 C r_1^2$ буде незначною порівняно з одиницею (тут f — частота напруги).

Налаштовування кола рамки на безреактивність дає змогу при вмиканні послідовно з рамкою додаткових активних опорів різної величини виготовити ватметр на яку завгодно номінальну напругу або на декілька номінальних напруг. Таке налаштування дає можливість уникнути кутової похибки, яка при неповній компенсації індуктивності рамки особливо проявляється при вимірюваннях у електричних колах з малим коефіцієнтом потужності та при роботі на підвищених частотах.

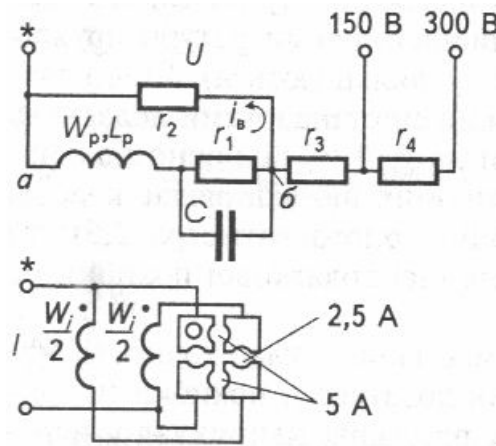


Рис. 9.2. Схема переносного ватметра

При виробництві ватметрів високих класів точності (класи 0,1; 0,2; 0,5) наявність такої компенсації дає змогу градувати ці прилади на постійному струмі, використовуючи особливо точні потенціометричні установки, і бути певним того, що ці прилади будуть здатні працювати як на постійному, так і на змінному струмі. Крім того, наявність скомпенсованої індуктивності обмотки-рамки виключає появу похибки від взаємодії, яку може створити ЕРС взаємодії, що наводиться у рамці при проходженні крізь неї змінного магнітного потоку, створеного струмом, що протікає по обмотках нерухомих котушок. Дійсно, рамка, що перебуває у змінному магнітному полі нерухомих котушок, є, по суті, вторинною обмоткою повітряного трансформатора, де первинна обмотка — це обмотка нерухомих котушок. За наявності опору r_2 у електричному колі, створеному рамкою і резисторами r_1 і r_2 , виникає електричний струм. Якщо ЕРС взаємодії має кут зсуву відносно магнітного потоку, що її викликав, 90° (що завжди буває у повітряних трансформаторів), і електричне коло, в якому циркулює струм від ЕРС взаємодії i_B — безреактивне (тобто чисто активне), то цей струм при взаємодії з магнітним потоком нерухомих котушок не створює ніякого обертового моменту.

Якщо ж індуктивність рамки не скомпенсовано, то струм від ЕРС взаємоіндуктивності буде зсунуто відносно магнітного потоку не на 90° , тоді з'явиться якийсь, хоч і малий, обертовий момент, що створюватиме похибку.

Крім *електродинамічних ватметрів*, для вимірювання потужності використовують також і *феродинамічні*.

У вимірювальних механізмів цих ватметрів нерухома котушка має феромагнітний магнітопровід, зроблений з електротехнічної сталі, пермалою чи пресованого феромагнітного порошку з ізоляційним заповнювачем. Цей магнітопровід має розрив, куди введено циліндричний центральний магнітопровід, навколо якого у вузькому повітряному проміжку переміщуються дві протилежні сторони рухомої обмотки-рамки, крізь яку проходить струм паралельного кола ватметра. Цей струм підводять до обмотки через дві спіральні пружини, якщо рухома частина вимірювального механізму спирається через керни на під'ятники, чи по розтяжках, якщо рухома частину підвішено на розтяжках. Принципова електрична схема феромагнітного ватметра практично не відрізняється від схеми електродинамічного. Завдяки наявності феромагнітного магнітопроводу з двома невеликими повітряними проміжками величина магнітної індукції у місці, де магнітний потік взаємодіє зі струмом, Що проходить по витках котушки-рамки, може бути значно більшою ніж у електродинамічного ватметра. Тому обертовий момент, створюваний рамкою, може бути досить великим навіть за меншої потужності, що втрачається у вимірювальному механізмі. Це сприяє підвищенню добротності приладу з таким механізмом і його стійкості до стороннього впливу. На феродинамічні прилади незначно впливають вібрації. Завдяки наявності значної індукції у робочому повітряному проміжку сторонні магнітні поля впливають на ці прилади менше, ніж на електродинамічні.

Разом з тим при роботі феромагнітних ватметрів на постійному струмі у них з'являється похибка від наявності гістерезису матеріалу магнітопроводу. Це видно по варіації показань приладу, тобто різниці показань одержаних спочатку при збільшенні, а потім при зменшенні струму у вимірювальному колі.

При роботі на змінному струмі у цих приладів з'являється значна кутова похибка, зумовлена наявністю втрат у магнітопроводі. Ця похибка може бути настільки великою, що її компенсують збільшенням індуктивності електричного кола рамки шляхом звичайного (не біфілярного) намотування котушок додаткового до рамки опору і навіть закладенням сталевих стрижнів у центральні отвори цих котушок.

Феродинамічні ватметри розраховані на невисокі класи точності. В основному їх використовують як стаціонарні прилади зі стрілочними покажчиками класу, що не вище 1,5. Зокрема, ці прилади виготовляють на кути відхилення покажчика аж до 240° .

Завдяки наявності у вимірювальних механізмах цих приладів значних обертових моментів на їхній основі виконують *реєструючі самописні прилади*.

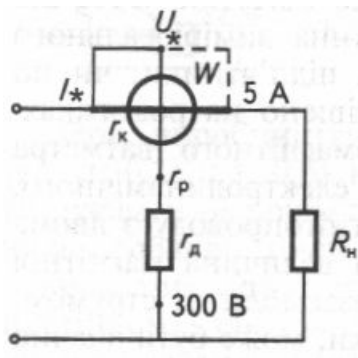


Рис. 9.3

Схема вмикання ватметра для вимірювання потужності

В Україні налагоджено серійний випуск переносного феродинамічного ватметра класу 0,5, здатного вимірювати потужність як на постійному, так і на змінному струмах.

Ватметрами вимірюють потужність у колах постійного і однофазного змінного струмів за схемою, що показана на рис. 9.3.

Затискачі, що позначені на приладах зірочками, обов'язково з'єднують перемичкою і приєднують до провідника, що йде від мережі. Зауважимо, що ватметр відхилятиметься в належному напрямі й при з'єднанні перемичкою затискачів, не позначених зірочками, але у цьому разі напругу мережі буде прикладено між рамкою і нерухомою котушкою, які розміщені в безпосередній близькості одна від одної. Саме через це за високої напруги (наприклад, 600 В) може статися пошкодження ізоляції (електричний пробій) і ватметр безумовно вийде з ладу. Якщо ж пробою не буде, то у ватметра може виникнути додаткова похибка через електростатичне притягання рамки до нерухомої котушки.

У схемі вмикання ватметра, зображений на рис. 9.3, він буде показувати потужність, споживану опором навантаження R_n (при вимірюваннях на змінному струмі цей опір може бути активно-індуктивний, або активно-ємнісний) та опором обмотки нерухомої котушки ватметра r_k . Якщо потужність, споживана цією обмоткою, вносить небажану похибку у вимірювання (а це можна перевірити простим розрахунком: $R_k = I^2 r_k$, де P_k — потужність, споживана обмоткою котушки; I — струм, що проходить через обмотку; r_k — активний опір обмотки), то перемичку можна встановити між затискачем на якому звичайно вказано величину номінального струму ватметра. Але у цьому разі ватметр разом з потужністю, споживаною опором навантаження, вимірюватиме й потужність у колі напруги ватметра (в обмотці його рамки r_p та у додатковому резисторі r_d). Втім, таке вмикання ватметра в умовах енергетичних підприємств майже ніколи не використовують. Його використовують при дослідженнях, якщо вони виконуються за малих напруг при струмах, близьких до номінального, і малих опорах R_n , коли величина вимірюваної потужності відносно невелика. При цьому буде зовсім невеликою і потужність, споживана колом напруги ватметра.

При вимірюванні потужності, споживаної пристроями, які здатні при певних умовах виробляти електричну енергію, ватметр змінює напрям руху покажчика і він заходить за нульову позначку. Звичайно, якщо у ватметра немає "від'ємної" ділянки шкали, вимірювання потужності припиняються. Для того, щоб поновити контроль за величиною потужності (тепер вже — генерованої!), у стаціонарних ватметрів досить поміняти місцями кінці провідників, що були під'єднані до затискачів кола струму. При цьому покажчик знову відхилятиметься на шкалу, а прилад буде вимірювати генеровану

бувши споживачем потужності.

У переносних ватметрів на такий випадок є перемикач полярності вмикання рамки, положення якого відповідають знакові споживаної потужності. Положення "+" перемикача відповідає виміру споживаної потужності, положення "—" — виміру генерованої споживачем потужності. Зауважимо, що позначення положень цього перемикача "+" і "—" не мають ніякого відношення до полярності постійного струму. Ці позначення відповідають роботі ватметра як на постійному, так і на змінному струмі.

Іноді цей перемикач суміщують з перемикачем величини номінальної напруги ватметра.

9.2. Трифазні ватметри. Вимірювання потужності у трифазних колах

У силовій енергетиці найчастіше вимірюють потужність у трифазних колах. Це зумовлено тим, що вся електрична енергія на електричних станціях виробляється трифазними генераторами змінного струму, а більша її частина споживається електродвигунами. Найбільш поширеними є трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які рівномірно навантажують електричні мережі. Вони економічні, найпростіші за будовою та надійні в роботі. Саме тому *трифазні ватметри* є досить поширеними на електричних станціях та в енергосистемах.

• **Трифазний ватметр** являє собою сукупність двох або трьох електродинамічних (чи феродинамічних) вимірювальних механізмів, розташованих уздовж осі приладу, рамки яких закріплені на цій осі, де також закріплено показчик (частіш за все — стрілка), балансувальні важелі й крило заспокоювача коливань.

Трифазні феродинамічні ватметри мають перевагу над електродинамічними, бо при більших обертових моментах їхні вимірювальні механізми мають меншу довжину, що скорочує довжину осі рухомої частини, а так — і довжину всього приладу. Крім того, завдяки більшій величині; індукції U повітряних проміжках магнітних систем та їхній екрануючій дії, ці ватметри менше підпадають під вплив зовнішніх магнітних полів, а їхні вимірювальні механізми своїми магнітними полями менше впливають один на одного.

У більшості випадків трифазні ватметри призначені для вимірювання потужності у трипровідних мережах (без нульового проводу). Такі ватметри доцільно робити двох-елементними. Схему такого стаціонарного ватметра наведено на рис. 9.4, а.

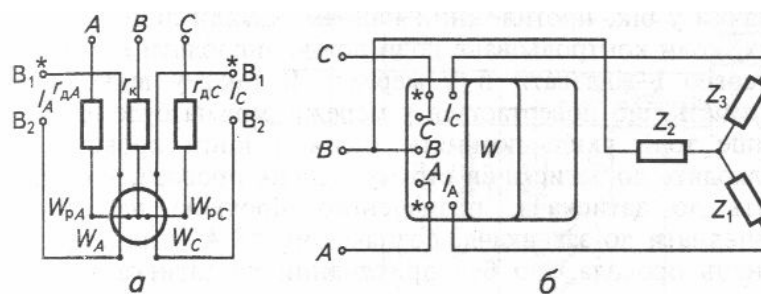


Рис. 9.4
Схема стаціонарного трифазного феродинамічного ватметра: а — принципова схема приладу; б — схема вмикання ватметра для вимірювань

На схемі цього ватметра позначено: W_A , W_C — струмові обмотки; W_{PA} , W_{PC} — обмотки рамок рухомої частини; r_{dA} , r_{dC} — додаткові опори кіл напруги ватметра;

r_k , — опір для часткової компенсації взаємного магнітного впливу вимірювальних механізмів. Його величина, порівняно з величиною опорів $r_{да}$ і $r_{дс}$, становить всього 1...2 % від їх величини.

Схему вмикання такого ватметра у трифазне коло вимірювання потужності, що споживається трьома резисторами Z_1 , Z_2 і Z_3 або трифазним електродвигуном, наведено на рис. 9.4, б.

При вимірюваннях, коли коефіцієнт потужності резисторів навантаження (сов ф) перевищує 0,5, обертові моменти обох вимірювальних механізмів додаються один до одного і загальний обертовий момент буде пропорційним активній потужності трифазного кола, складеного з опорів Z_1 , Z_2 , Z_3 . Цей прилад здатний правильно вимірювати потужність і у випадку несиметричного трифазного кола, якщо вказані опори будуть різні за величиною.

Якщо опори Z_1 , Z_2 , Z_3 мають значну реактивну складову і коефіцієнт потужності їх менший ніж 0,5, то обертовий момент одного із вимірювальних елементів буде відніматися від обертового моменту іншого, але ця різниця все одно буде пропорційною активній потужності, що споживається резисторами Z_1 , Z_2 і Z_3 цього трифазного кола.

Показчик ватметра може відхилитися від нульової позначки у бік, протилежний напрямку шкали лише у випадках, коли контрольоване коло почне виробляти електричну енергію і віддавати її у мережу. В такому випадку потужність, що повертається у мережу, можна буде виміряти лише тоді, якщо поміняти місцями кінці проводів, що підходять до затискачів струму: кінець провода, що підходить до затискача, позначеного зірочкою на фазі А, приєднати до затискача, позначеного "5 А" цієї ж фази, а кінець провода, що був приєднаний до затискача "5 А", приєднати до затискача, позначеного зірочкою. Те ж саме слід зробити і на фазі С.

Зі схеми ватметра видно, що дві рамки, розташовані на рухомій частині приладу, потребують приєднання кінців їхніх обмоток аж у чотирьох місцях. Реально ж ці приєднання виконують дві спіральні пружини, які створюють і момент протидії, а також два тонких "безмоментних" струмопідводи. Бажання зменшити число цих підводів до одного (бо частіш за все їх виготовляють із золота) призводить до необхідності вмикати додаткові опори $r_{да}$ і $r_{дс}$ між кінцями обмоток рамок і затискачами, до яких підводяться напруги (А і С) мережі. У цьому випадку між обмотками ра- і мок і відповідними їм обмотками нерухомих котушок буде прикладено значні напруги, що може викликати похибки від електростатичного тяжіння між рамками та нерухомими струмовими обмотками. Але у цьому разі кінці обмоток рамок, не приєднані до додаткових опорів, можна звести в одну точку, для з'єднання якої з нерухожим опором r_k потрібен лише один "безмоментний" струмопідвід.

Трифазний ватметр виконано на номінальний струм 5 А, що дає можливість при необхідності використати його з трансформаторами струму для вимірювань у трифазних колах, де струми значно більше за 5 А.

Номінальна напруга ватметра, що розглядається, може бути 127, 220 чи 380 В. У випадках, коли вимірювальне коло має більшу напругу, необхідно користуватись вимірювальними трансформаторами напруги з первинною напругою, що відповідає номінальній напрузі мережі, від якої живиться схема.

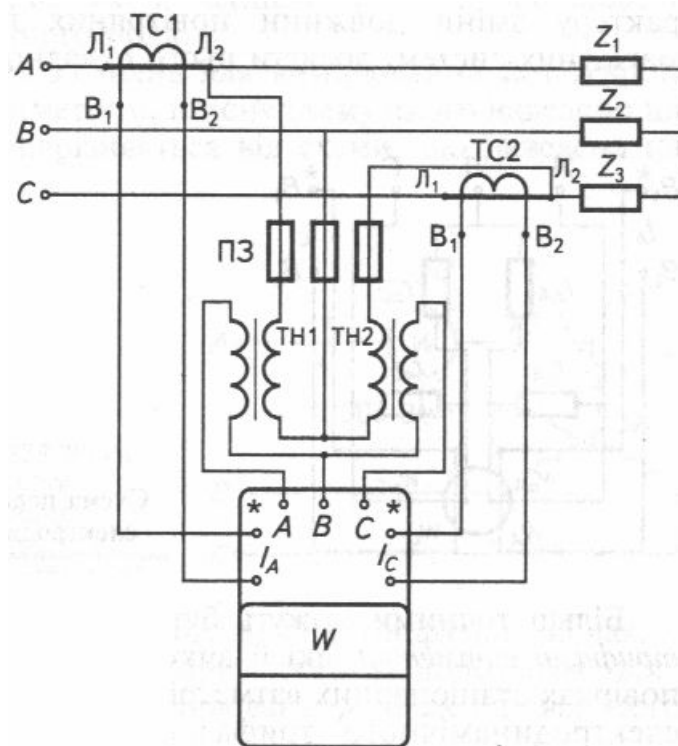


Рис. 9.5

Схема вимірювання потужності трифазного кола трифазним ватметром із застосуванням вимірювальних трансформаторів струму і напруги

У разі використання при вимірюваннях потужності трансформаторів струму чи напруги вимірювана потужність дорівнюватиме показанню ватметра, помноженому на коефіцієнт трансформації трансформатора струму чи напруги.

Якщо ж користуватися і трансформаторами струму, й трансформаторами напруги, вимірювана потужність дорівнюватиме показанню ватметра, помноженому на добуток від множення коефіцієнтів трансформації трансформаторів, струму і напруги.

Схему вимірювання потужності Z_1 , Z_2 , Z_3 трифазним ватметром із застосуванням трансформаторів струму TC1, TC2 і напруги TH1, TH2 наведено на рис. 9.5.

Плавкі запобіжники ПЗ в цій схемі захищають трансформатори напруги TH1, TH2 від струмів короткого замикання у їхніх власних колах.

Стационарні трифазні ватметри виготовляють відносно невисоких класів точності (2,5; 4,0), що пояснюється складністю виробництва цих приладів, у яких мають збігатися показання при роздільних вимірах окремо на кожному з елементів. У феродинамічних приладів, де різниця показань може виникнути через наявність дещо різного характеру зміни довжини повітряних проміжків у їхніх і магнітних систем, досягти цього складно.

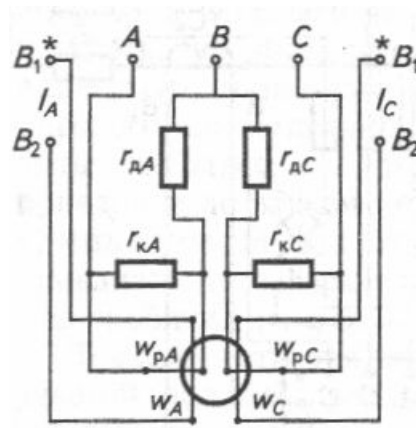


Рис. 9.6

Схема переносного трифазного електродинамічного ватметра

Більш точними можуть бути *переносні електродинамічні трифазні ватметри*, які й використовують як зразкові при повірках стаціонарних ватметрів. Схему такого переносного електродинамічного трифазного ватметра показано на рис. 9.6, де всі позначення такі самі, що й на рис. 9.4. Різниця між цими схемами лише в тому, що більш точний електродинамічний ватметр (рис. 9.6) має резистори температурної компенсації r_{KA} і r_{KC} , виконані з манганіну. При підвищенні температури довкілля, коли дещо зменшується момент протидії пружинок, збільшується опір обмоток рамок і струм, що проходить по цих обмотках, трохи зменшується, перерозподіляючись між обмотками і резисторами r_{KA} і r_{KC} , опір яких лишається практично незмінним. В результаті дещо зменшується обертовий момент, створюваний рухомою частиною приладу. Таким чином, показчик приладу при зміні температури довкілля показує дійсне значення потужності (звичайно, в межах класу приладу), незалежно від величини температури.

Крім того, у схемі цього ватметра відсутній резистор, що компенсує взаємний магнітний вплив обмоток нерухомих котушок. Це стало можливим завдяки встановленню у цьому ватметрі магнітного екрана, виконаного з пермалою, що виключає можливість взаємного магнітного впливу. Окрім цього екрана, в приладі є ще один, який охоплює весь вимірювальний механізм і захищає прилад від впливу зовнішнього магнітного поля.

Схема зовнішніх з'єднань для вимірювання потужності трифазного кола ватметром, власну схему якого наведено на рис 9.6, нічим не відрізняється від схеми, що наведена на рис. 9.4, б.

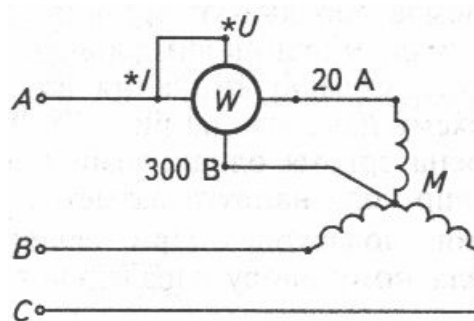


Рис. 9.7. Схема вимірювання потужності, споживаної трифазним двигуном, однофазним ватметром

Величина потужності, споживана у трифазних колах, у багатьох випадках може вимірюватись за допомогою ватметрів, призначених для вимірювань у колах однофазного змінного струму.

Схему, придатну для вимірювання потужності, споживаної трифазним асинхронним двигуном, за допомогою однофазного ватметра, наведено на рис. 9.7. Цей ватметр ввімкнено на одну фазу електродвигуна, робочі (фазні) обмотки якого з'єднано за схемою "зірка". Зважаючи на те, що за технологією виготовлення електродвигуна його робочі обмотки однакові (тобто мають однакову кількість витків, виконаних ізольованим дротом з однаковою площею поперечного перерізу) і закладені у пази статора, однорідно в усіх трьох фазах, слід очікувати, що й струми обмоток фаз двигуна і потужності будуть однаковими. Тобто кожна фаза обмотки двигуна при симетричній трифазній напрузі буде споживати однакові з іншими фазами струми і потужності. Причому споживана кожною фазою двигуна потужність становить третину від загальної потужності, споживаної від мережі. Тому однофазний ватметр, ввімкнений на вимірювання потужності, споживаної однією фазою обмотки двигуна, буде показувати величину потужності, що дорівнює $1/3$ від загальної. Для визначення величини потужності, споживаної трифазним двигуном (всіма трьома його фазами), показання ватметра, ввімкненого лише на одну фазу, необхідно помножити на три.

Звичайно, при наявності несиметрії напруг між проводами мережі цей метод даватиме похибки. Але при реальних умовах експлуатації сучасних трифазних мереж поява скільки-небудь значної несиметрії напруг є маловірогідною.

У разі, коли доступу до нульової точки електродвигуна немає або двигун встановлено далеко від місця, зручного для розміщення вимірювальних приладів, можна користуватися схемою вмикання ватметра зі штучним нулем. Таку схему наведено на рис. 9.8. Тут штучна нульова точка створена трьома однаковими опорами: один з них — власний опір кола напруги ватметра, а два інших (r_1 та r_2) — однакові додаткові опори, величина кожного з яких дорівнює власному опору паралельного кола ватметра.

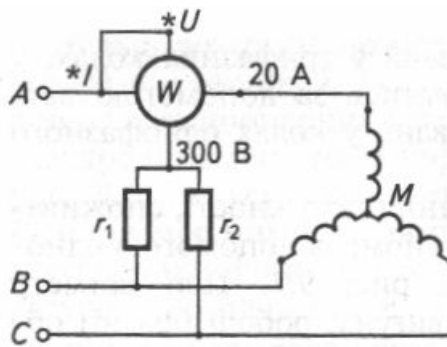


Рис. 9.8

Схема вимірювання потужності, споживаної трифазним електродвигуном, однофазним ватметром зі штучною нульовою точкою

При такій схемі вимірювання потужності, як і при вимірюваннях за попередньою схемою (рис. 9.7), виміряну ватметром W потужність слід множити на

три.

Обидві схеми (рис. 9.7 та 9.8) придатні лише для вимірювань у симетричних колах трифазного струму.

Для вимірювань як у симетричних, так і несиметричних **за** навантаженням трипровідних трифазних електричних кодах найчастіше використовують схему з двома однофазними ватметрами (так звану схему Арона), що наведено на рис. 9.9.

При користуванні цією схемою слід враховувати, що потужність, споживана симетричним трифазним колом з навантаженням $Z_1=Z_2=Z_3$, дорівнюватиме сумі показань обох ватметрів при коефіцієнтах потужності від одиниці до 0,5. Якщо ж цей коефіцієнт буде меншим за 0,5, то необхідно змінити положення перемикача полярності того ватметра, показання якого стали від'ємними (покажчик приладу зайшов за нульову позначку в бік, протилежний напрямку шкали). У подальшому, коли перемикач полярності перебуває в положенні мінус, для визначення величини потужності, споживаної трифазним колом, показання цього ватметра треба віднімати від показань ватметра, у котрого перемикач полярності перебуває в положенні плюс.

Можна зробити висновок, що схема трифазного ватметра, яку було розглянуто раніше (див. рис. 9.6), повністю збігається зі схемою рис. 9.9.

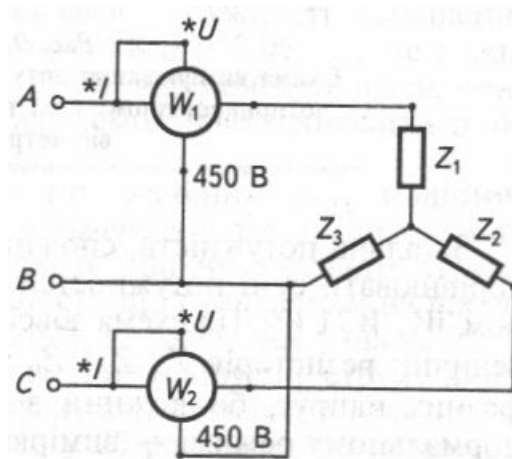


Рис. 9.9

Схема вимірювання потужності у трифазному трипровідному колі двома однофазними ватметрами

Різниця полягає лише в тому, що при роботі зі схемою вимірювання потужності двома ватметрами спостерігач повинен складати чи віднімати показання цих ватметрів, а у трифазному ватметрі, що складається з двох вимірювальних елементів, ці операції виконує сам прилад на рівні складання чи віднімання обертових моментів, створених цими елементами.

При необхідності вимірювання величини потужності у чотирипровідних трифазних колах, де у більшості випадків величини опорів по фазах неоднакові ($Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$), вимірювання проводять за допомогою трьох однофазних ватметрів, ввімкнутих так, як показано на рис. 9.10. На цій схемі три і однофазних ватметри W_1 , W_2 і W_3 ввімкнені на фазні струми і фазні напруги. Тобто кожний ватметр вимірює активну потужність, споживану одним з опорів Z_1 , Z_2 чи Z_3 .

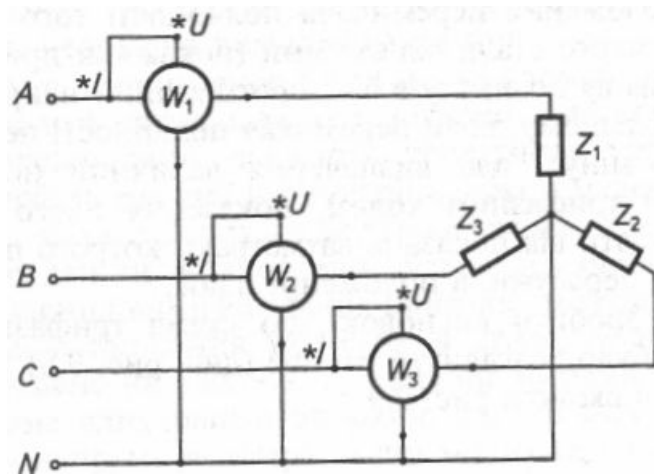


Рис. 9.10

Схема вимірювання потужності у трифазному чотирипровідному колі трьома однофазними ватметрами

Загальна потужність, споживана трифазним колом, буде дорівнювати сумі потужностей, виміряних кожним ватметром W_1 , W_2 і W_3 . Ця схема зовсім не чутлива як до асиметрії величин резисторів Z_1 , Z_2 і Z_3 так і до асиметрії лінійних і фазних напруг, бо кожний з ватметрів працює у своєму нормальному режимі — вимірювань потужності в однофазному колі змінного струму.

9.3. Малокоcosинусні ватметри

У випадках, коли необхідно вимірювати потужність у електричних колах зі значними величинами реактивних опорів (індуктивних чи ємнісних), при відносно малій величині активних опорів цих кіл, застосування звичайних ватметрів змінного струму небажане через наявність у них так званої кутової похибки, яка саме у цих випадках виявляється повною мірою. Це буває, наприклад, при вимірюваннях втрат холостого ходу трансформаторів, при визначенні величини питомих втрат у магнітом'яких матеріалах (наприклад, в електротехнічних сталях) і, іноді, при визначенні втрат у конденсаторах, коли коефіцієнт потужності малий і досягає всього 0,05...0,1.

Кутова похибка викликана тим, що магнітний потік, створюваний нерухомими котушками ватметра, не збігається по фазі зі струмом, що проходить обмоткою цих котушок, а струм у рухомій рамці приладу не збігається по фазі з напругою, прикладеною до затискачів приладу. Крім того, у звичайного ватметра при вимірюваннях у колах з малими коефіцієнтами потужності відхилення показчика буде незначним (при $\cos \varphi = 0,05...0,1$ це відхилення становить всього 5...10 % від повного відхилення показчика), при якому взагалі неможливо проводити точні вимірювання.

Відмінність спеціально призначених для подібних вимірювань *малокоcosинусних ватметрів* у тому, що повного відхилення показчика досягають при номінальних струмі, напрузі та коефіцієнті потужності, що позначений на шкалі. Тобто при потужності, меншій у 10 разів, ніж у звичайного ватметра, розрахованого на ті самі напругу і струм, якщо номінальний коефіцієнт потужності, позначений на шкалі, буде 0,1 і при потужності, що у 20 разів менша, якщо цей номінальний коефіцієнт потужності дорівнюватиме 0,05. Звичайно, при високих значеннях коефіцієнтів потужності чи

при вимірюваннях на постійному струмі, якщо напруга і струм близькі до номінальних, цим приладом не користуються, бо він буде значно перевантажений дією власного обертового моменту. При цьому показчик приладу завжди буде за границею шкали, а рухома частина спиратиметься у механічний обмежувач переміщення цієї частини.

Малокосинусні ватметри мають дуже малу кутову похибку. Цього досягають старанною компенсацією цієї похибки при виробництві приладів.

Малокосинусні ватметри, про які йде мова, виробляли в Україні. Ватметр мав чотири границі вимірювань за номінальною напругою: 75; 150; 300; 600 В, і три — за номінальним струмом: 2,5; 5,0; 10,0 А (чи 0,25; 0,5; 1,0 А). Номінальний коефіцієнт потужності цього ватметра 0,1.

9.4. Вимірювання потужності в колах підвищеної частоти

Потужність у колах підвищеної частоти в умовах роботи електричних станцій і експлуатації електричних мереж вимірюється в виняткових випадках. Але у енергогосподарствах промислових підприємств такі вимірювання є вкрай необхідними. Наприклад, при обслуговуванні плавильних і термічних установок, які живляться головним чином від електромашинних генераторів підвищеної частоти (їхні номінальні частоти, залежно від номінальної потужності, можуть бути в межах 250...10 000 Гц).

На промислових підприємствах інколи необхідно вимірювати потужність й на значно більших частотах — у високочастотних нагрівальних установках, що працюють з частотою від 70 кГц до багатьох мегагерц.

Вимірювання потужності дають можливість персоналові цілком свідомо налаштовувати установки підвищеної частоти на найбільш доцільний режим роботи, коли необхідна для нагріву потужність споживатиметься технологічними установками за найменших значень напруги і струму генерувальної установки.

У межах частот 250...8000 Гц вимірювання потужності проводяться електродинамічними ватметрами, обладнаними вузлом компенсації індуктивного опору обмотки рамки (див. рис. 9.2). Цей вузол складається з паралельно з'єднаних конденсатора C і опору r_L . Тільки величини ємності й опору цього вузла слід знаходити з більш точного виразу, ніж той, що було наведено для компенсації індуктивності на відносно малих частотах.

Якщо величина індуктивності котушки-рамки L_K відома, можна прийняти якусь реальну величину ємності C (з тих величин, що випускаються промисловістю) і для неї розраховувати потрібну величину опору

$$r_1 = \sqrt{\frac{L_K}{C - L_K \omega^2 C^2}}.$$

Необхідно лише, щоб одержана величина опору була б значно меншою за активний опір всього кола напруги ватметра.

Звичайно, таку величину r_1 необхідно розрахувати саме для номінальної кутової частоти ω_H , на якій належить працювати ватметру ($\omega_H \approx 2\pi f_H$).

Реально в Україні серійно вироблялись однофазні електродинамічні ватметри номінальної частоти 1000, 2500 і 8000 Гц, а також трифазні на частоту 500 Гц. Схема вмикання таких ватметрів для вимірювання потужності на однофазному струмі така сама, що й на рис. 9.3, а трифазного — як на рис. 9.4, б.

9.5. Вимірювання реактивної потужності

Реактивну потужність споживачів електричної енергії вимірюють *варметрами*. Ці прилади конструктивно не відрізняються від ватметрів, що розглянуто раніше. Різниця полягає лише у схемі кіл напруги. Якщо у ватметрів у колі напруги намагаються повністю компенсувати індуктивність котушок-рамок, то у варметрів у цьому колі намагаються створити, за рахунок додаткових індуктивностей, зсув фази у 90° . На жаль, сучасний рівень техніки не дає змоги простим ввімкненням індуктивності створити у будь-якому колі зсув фази у 90° між прикладеною до нього напругою і струмом через наявність активного опору у самої котушки індуктивності. Застосувавши ж подвійний зсув струму, як показано на схемі рис. 9.11, можна одержати зсув фаз на 90° і більше.

У цьому разі зсув струму у рамці i_p відносно напруги U вже нескладно буде дорегулювати точно до 90° . Для цього необхідно змінити якусь величину $r_{ш}$, $r_{рег}$ чи L_d , а то й дві з них.

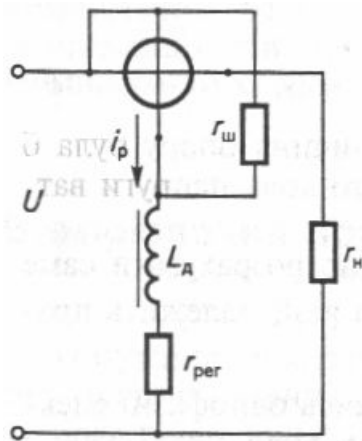


Рис. 9.11. Схема ватметра реактивної потужності для однофазних кіл

Вказану операцію підрегулювання слід проводити при номінальній напрузі U у колі, де опір r_H — чисто активний. Регулювання можна проводити, не вимірюючи

кути, що розглянуто, доти, доки показчик не опиниться на нульовій позначці при наявності номінальних напруги і струму.

У варметра відхилення показчика від нуля почнеться лише при введенні в коло струмових обмоток хоч якої-небудь індуктивності, що створюватиме реактивну потужність, яку буде вимірювати цей варметр.

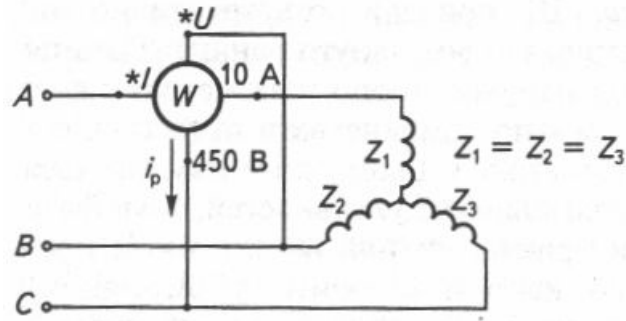


Рис. 9.12

Схема вимірювання реактивної потужності у трифазному симетричному колі однофазним ватметром активної потужності

Для вимірювання реактивної потужності у трифазних симетричних колах застосовують схему, показану на рис. 9.12, де для вимірювань застосовують звичайний ватметр активної потужності. Необхідний зсув на 90° фази струму i_p обмотки-рамки відносно фазової напруги тієї фази, на струм якої увімкнено струмову обмотку ватметра W , створюється сам собою. Це відбувається тому, що лінійна напруга між фазами, вільними від струмової обмотки ватметра W , зсунута на 90° відносно фазової напруги фази, у котру увімкнено струмову обмотку.

Для визначення повного значення реактивної потужності, споживаної всіма опорами навантаження Z_1 , Z_2 і Z_3 (які для цієї схеми мають бути однаковими), показання ватметра, що одержане, слід помножити на $\sqrt{3}$. Пояснюється це тим, що однофазний ватметр, застосований у цій схемі, вимірює лише потужність одного опору Z_1 (то виходить, що показання слід було б помножити на три), але при цих вимірюваннях до нього прикладено не фазову напругу, а більшу за неї у $\sqrt{3}$ рази лінійну напругу (тобто показання ватметра виявляються завищеними у $\sqrt{3}$ рази і їх необхідно було б зменшити у стільки ж разів). Таким чином, з одного боку, показання ватметра слід збільшити у три рази, а з іншого — зменшити у $\sqrt{3}$ рази, тобто ці показання необхідно збільшити у $3/\sqrt{3} \square \sqrt{3}$ рази.

У випадках, коли чотирипровідна трифазна система, де треба вимірювати реактивну потужність, симетрична за напругами живлення, але несиметрична за величинами опорів навантаження ($Z_1 \square Z_2 \square Z_3$), для вимірювань можна застосовувати три ватметри активної потужності й кожний з них приєднати за схемою, що наведена на рис. 9.12. Тоді загальна вимірювана реактивна потужність буде дорівнювати сумі потужностей трьох застосованих ватметрів, поділеній на $\sqrt{3}$.

Якщо ж для вимірювання реактивної потужності у такій чотирипровідній системі застосовано ватметри реактивної потужності (варметри), то їх вмикають як і

звичайні ватметри активної потужності (див. рис. 9.10).

Ця вимірювальна схема даватиме правильні показання за якої завгодно асиметрії напруг живлення і за якої завгодно асиметрії опорів навантаження. Загальна споживана реактивна потужність у цій схемі дорівнює сумі реактивних потужностей, виміряних цими трьома ватметрами.

Слід зауважити, що при прямому вмиканні (без вимірювальних трансформаторів струму і напруги) ватметрів для вимірювання реактивної потужності, між рамкою і обмоткою нерухомої котушки ватметра прикладено напругу значної величини. Це небезпечно за умов електричного пробоя ізоляції, а також через появу електростатичної взаємодії між рамкою та нерухомою котушкою, що призводить до появи похибки у показаннях приладу. В разі застосування вимірювальних трансформаторів та заземлення їхніх вторинних кіл безпеки пробоя електричної ізоляції між колами цього приладу немає.

Контрольні запитання:

1. Вимірювальні механізми яких систем найчастіше використовують у ватметрах?
2. З якою метою резистори, що ввімкнені в коло напруги ватметра, виготовляють з манганінового проводу?
3. Чому в електродинамічному ватметрі може з'явитися додаткова похибка від зміни температури довкілля?
4. Як зменшують величину додаткової похибки від зміни величини температури довкілля у ватметрів високих класів точності?
5. Який характер шкали мають електродинамічні ватметри?
6. Як захищають ватметри від дії зовнішніх магнітних полів?
7. З якою метою застосовують перемикач полярності у переносних ватметрах?
8. Як улаштовано трифазний ватметр?
9. Як за допомогою однофазного ватметра виміряти потужність, споживану трифазним асинхронним електродвигуном?
10. Що таке кутова похибка ватметра і чому вона виникає?
11. У яких випадках застосовують малокосинусні ватметри?
12. За яких умов малокосинусні ватметри можна використовувати при вимірюваннях у колах постійного струму?
13. Як досягти однакової точності вимірювань потужності ватметра на постійному та змінному струмах?

ЛЕКЦІЯ 10 ЛІЧИЛЬНИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ. ВИМІРЮВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Енергія, споживана в електричних колах чи окремими ділянками цих кіл, вимірюється лічильниками електричної енергії. Лічильник електричної енергії змінного струму являє собою вимірювальний механізм, переважно індуктивної системи, з необмеженим кутом повороту рухомої частини, механічно з'єднаний з пристроєм рахунку числа обертів рухомої частини (механічним лічильником). Лічильник електричної енергії постійного струму відрізняється від лічильника енергії змінного струму системою вимірювального механізму. У цьому лічильнику є вимірювальний механізм електродинамічної системи.

Лічильники електричної енергії змінного струму — це найпоширеніші електровимірювальні прилади, які встановлюють як на електричних станціях, так і в усіх споживачів електричної енергії, бо саме за їхніми показаннями вони розраховуються з енергопостачаючими організаціями.

Лічильники, якими користуються побутові споживачі, мають номінальні струми від п'яти до кількох десятків ампер. Призначені вони для прямого вмикання у мережу. Лічильники, що встановлюються на електричних станціях та у промислових споживачів, мають номінальний струм переважно 5 А, але розраховані на обов'язкове вмикання їхніх струмових обмоток у мережу через вимірювальні трансформатори струму. Якщо облік енергії, що споживається, проводиться при високій напрузі, то користуються лічильниками з номінальною напругою 100 В, але із застосуванням вимірювальних трансформаторів напруги.

10.1. Лічильники електричної енергії однофазного змінного струму. Вимірювання енергії в однофазних колах змінного струму

Найбільшого поширення набули *однофазні лічильники змінного струму*. Їх встановлюють для обліку споживання електричної енергії в кожній квартирі.

Будову індукційного однофазного лічильника показано на рис. 10.1. Лічильник складається з двох електромагнітних пристроїв 1 і 7, які створюють змінні магнітні потоки, що перетинають алюмінієвий диск 6, який разом із віссю 2 і черв'яком 3 складають рухому частину приладу. Біля периферії диска 6 встановлено постійний магніт 5, магнітний потік котрого також перетинає диск 6.

Обмотку одного з електромагнітних пристроїв, наприклад пристрою 1, виконано великою кількістю витків тонкого мідного проводу. Ця обмотка приєднується паралельно електричній мережі. Обмотку другого пристрою 7 виконано малим числом витків проводу значного перерізу, бо ця обмотка приєднується послідовно з навантаженням і саме через неї проходить споживаний струм. Змінний магнітний потік пристрою 1 створює у диску 6 електрорушійну силу, що викликає у нього струм, який, потрапляючи в зону дії магнітного потоку пристрою 7, утворює обертовий момент. Так само ЕРС, створена у диску пристроєм 7, призводить до протікання у ньому струму, який, взаємодіючи з магнітним потоком пристрою 1, також утворює обертовий момент. Під дією цих обертових моментів диск 6 обертається.

При обертанні диска 6 у його частині, що взаємодіє з магнітним потоком, створеним постійним магнітом 5, виникає гальмівний момент, який буде тим більшим, чим більшою є швидкість обертання диска 6.

Таким чином, на рухому частину лічильника водночас діють два моменти —

обертовий, пропорційний напрузі, струму й коефіцієнту потужності (тобто пропорційний споживаній потужності), і гальмівний — пропорційний швидкості обертання.

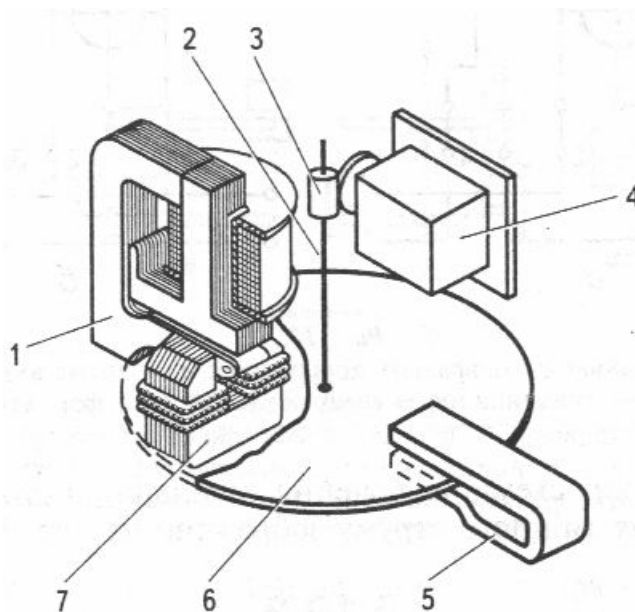


Рис. 10.1

Індукційний лічильник електричної енергії однофазного змінного струму

Обертання диска з незмінною швидкістю можливе, якщо обертовий і гальмівний моменти однакові. Тобто кожному значенню активної потужності, споживаної контрольованою ділянкою електричного кола, відповідатиме певна швидкість обертання диска. Через черв'як обертання рухомої частини приладу передається механічному лічильникові 4.

У зв'язку з тим, що швидкість обертання рухомої частини пропорційна потужності, кут повороту її буде пропорційний енергії, що споживається контрольованою ділянкою електричного кола.

Передаточне число передавального механізму від осі з диском до вхідної осі механічного лічильника вибирають таким, щоб зміна показання на кожну цифру правого віконця лічильника відповідала б одиниці енергії (наприклад, одній кіловат-годині або її десятій частині (гектоватгодині)).

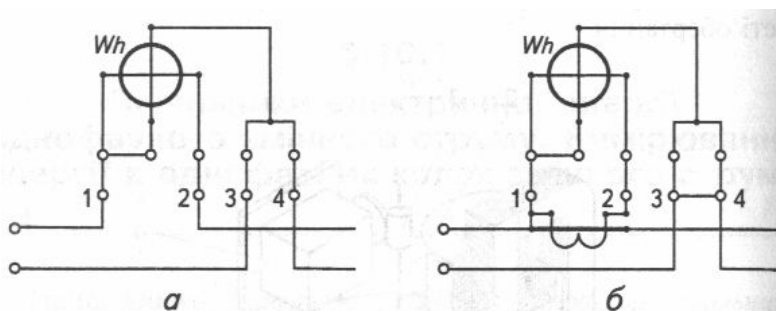


Рис. 10.2

Схеми вмикання однофазних лічильників: а — пряме вмикання в мережу; б — вмикання через вимірювальний трансформатор струму

Електричні схеми включення лічильників для вимірювань у колах змінного струму зображено на рис. 10.2.

10.2. Трифазні лічильники. Вимірювання енергії, споживаної у трифазних колах

На промислових підприємствах, де електропостачання виконується за трифазною системою, користуються *трифазними лічильниками* (а іноді — кількома однофазними).

Будову трифазних лічильників показано на схемах рис. 10.3. З чотирьох, наведених на цьому рисунку, схем, видно, що рухомі частини трифазних лічильників можуть бути одно-, дво- і тридисковими (рис. 10.3, а — г). Найпростіший і найкомпактніший з них — одnodисковий, у якого на один диск водночас діють два пристрої, створюючи магнітні потоки та обертові моменти (див. рис. 10.1).

Далі кожний з цих пристроїв будемо називати "елемент". У кожного з цих елементів є два магнітопроводи (верхній і нижній) з відповідними обмотками. Обмотки верхніх магнітопроводів будемо вважати обмотками напруги, а нижніх — обмотками струму. Обидва елементи в цьому лічильнику взаємодіють з одним і тим самим диском. Для запобігання взаємному впливові елементів, їх розміщують якомога далі один від одного. Найкраще, щоб це було діаметрально протилежно. Але й у цьому разі струми, що створюються ними у диску, розтікаючись по

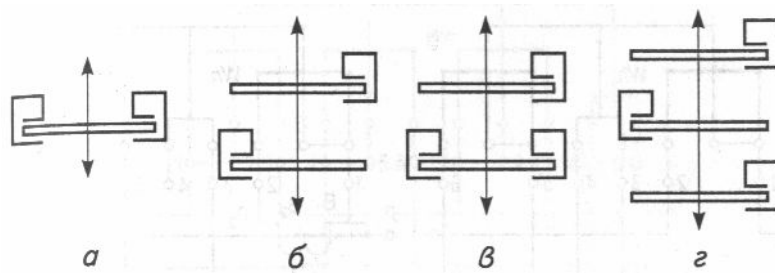


Рис. 10.3. Схеми будови трифазних лічильників: а — одnodисковий, двоелементний; б — дводисковий, двоелементний; в — дводисковий, трьохелементний; г — тридисковий, трьохелементний

ньому, все ж впливають один на одного і створюють похибку. Регульовальними органами, які є на елементах лічильника, цей вплив частково компенсують ще на заводі-виготовлювачі, змінюючи величину обертових моментів, створюваних елементами. Але ця компенсація діє тільки за певного порядку черговості фаз напруг трифазної системи. Тому, перед встановленням і підімкненням двоелементного трифазного лічильника до мережі необхідно за допомогою фазопоказчика визначити порядок чергування фаз напруг мережі й приєднувати обмотки струмів і напруг саме на ті фази, які вказано на приєднувальних контактах лічильника. Зазначимо, що лічильник може обертатися в потрібному напрямі й у разі недотримання рекомендованого порядку чергування фаз, але при цьому точність його показань не гарантується.

Якщо лічильник виконано з двома дисками, як показано на рис. 10.3, б,

взаємний вплив елементів виключено і на останнє застереження можна не зважати.

На рис. 10.4 показано схеми приєднання *трифазних* *двохелементних* лічильників як прямо у мережу, якщо у контрольованому колі величини споживаних струмів не перевищують величини номінального струму приладу, так і з застосуванням вимірювальних трансформаторів струму. Звичайно, у цьому разі номінальний вторинний струм трансформаторів струму має відповідати номінальному струму лічильника.

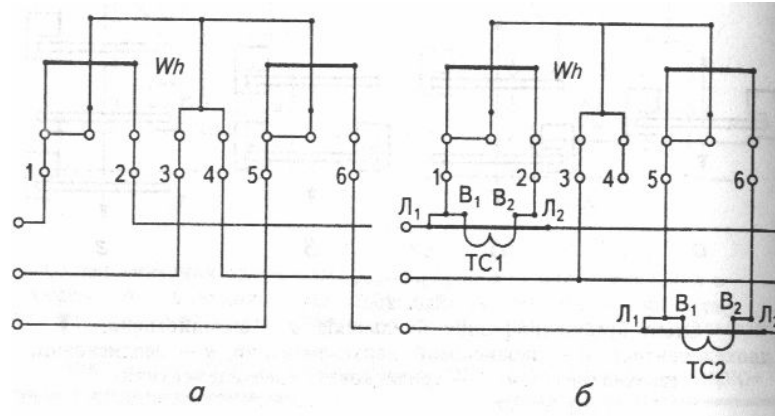


Рис. 10.4

Схеми вмикання трифазних *двохелементних* лічильників:
а — *пряме*; *б* — *за допомогою вимірювальних трансформаторів струму*

Двохелементні трифазні лічильники добре працюють у мережах з однаковими напругами між фазними проводами мережі. При наявності неоднакових лінійних напруг неминучі похибки. Величини струмів, що протікають по лінійних проводах, не обов'язково повинні бути однаковими.

Для вимірювань енергії при наявності несиметрії напруг і струмів у трифазній мережі слід користуватися *трифазними* ' *трьохелементними* лічильниками, виконаними згідно з конструктивними схемами, наведеними на рис. 10.3, *в*, *г*. У схемах рис. 10.5 кожний з елементів лічильника створює обертовий момент, пропорційний потужності, споживаної однією з фаз навантаження. Загальний же момент, що діє на рухому частину лічильника, пропорційний потужності, споживаної всім трифазним колом, контрольованим лічильником. Тому і величина енергії, виміряної лічильником, у цьому випадку дорівнює величині енергії, споживаної всім колом.

У чотирипровідних трифазних системах з якою завгодно несиметрією напруг і струмів енергія може вимірюватися трьома лічильниками, ввімкненими так, як показано на рис. 10.6, *б*.

В обох випадках загальну величину споживаної енергії знаходять як суму енергій, визначених за показаннями двох

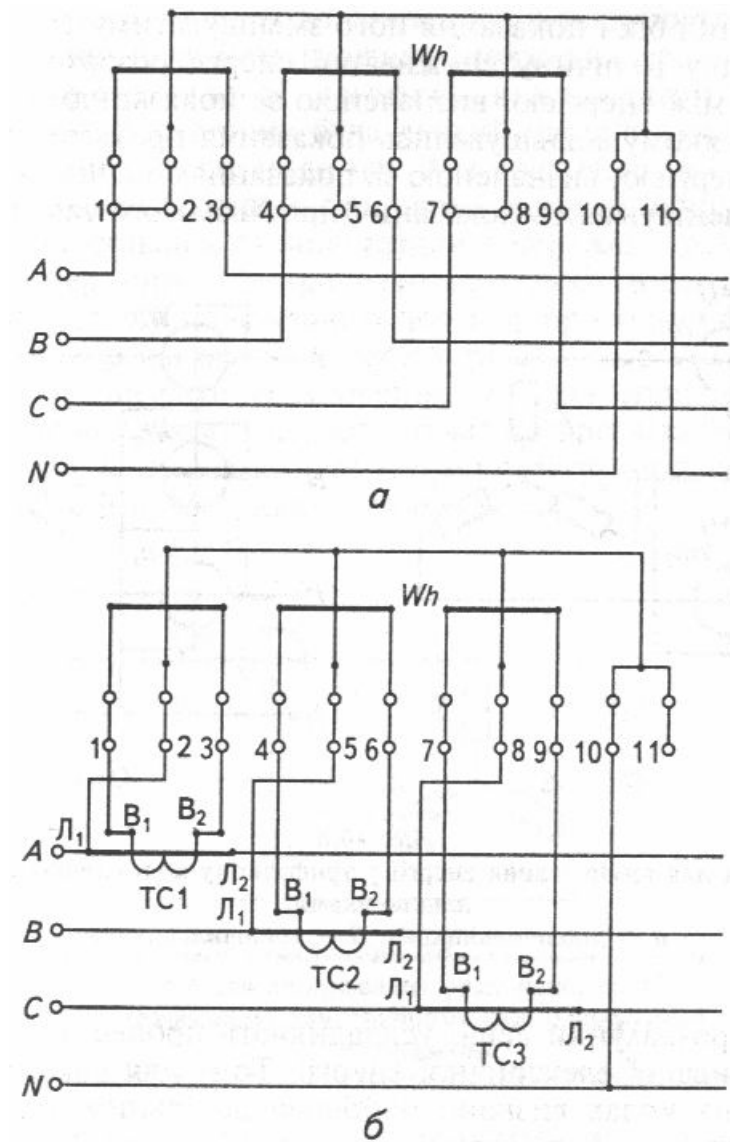


Рис. 10.5

Схеми вмикання трифазних трьохелементних лічильників:
а — пряме для вимірювань у колі з несиметричним навантаженням;
б — за допомогою трансформаторів струму

лічильників, якщо вимірювання проводять вмиканням згідно зі схемою рис. 10.6, *а*, і трьох лічильників, якщо їх було ввімкнено за схемою, зображеною на рис. 10.6, *б*. Зауважимо, що при вимірюваннях за схемою рис. 10.6, *а* якщо величина коефіцієнта потужності споживача енергії буде меншою, ніж 0,5, один із лічильників обертатиметься у зворотний бік і показання його зменшуватимуться. В цьому випадку величину споживаної енергії розраховують як різницю між енергією, визначеною за показаннями лічильника, на якому збільшувались показання протягом певного часу, і енергією, визначеною за показаннями лічильника, на якому зменшувались показання протягом того самого часу.

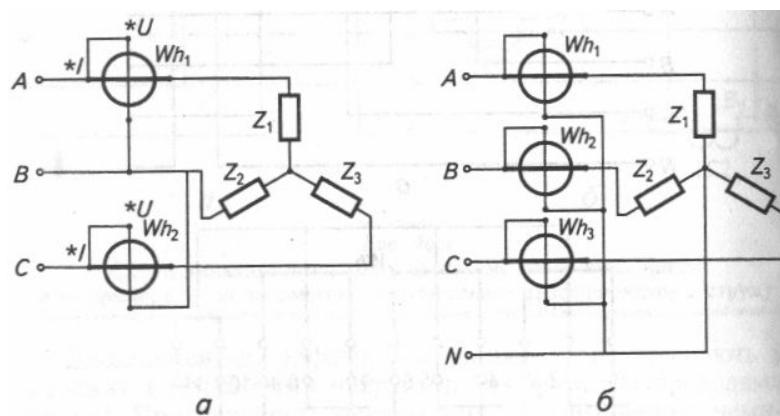


Рис. 10.6

Схеми для вимірювання енергії у трифазному колі однофазними лічильниками:
а — дволічильникова; б — трілічильникова

Такі розрахунки дещо ускладнюють процес вимірювання споживаної електричної енергії. Тому для вимірювань у трифазних колах визнано найбільш доцільним користуватися трифазними лічильниками.

10.3. Вимірювання реактивної електричної енергії

Важливим показником доцільного використання електричної енергії є співвідношення між кількістю активної енергії, що була беззаперечно споживана споживачем, і кількістю реактивної енергії, яка протягом кожного періоду змінного струму була деякий час споживана з мережі, а потім повернута до неї. Але хоча енергія і була повернута до мережі, струм, при якому енергію забирали і повертали, викликав додаткові втрати в мережах, трансформаторах і генераторах. Це призводить до необхідності дещо завищувати площу поперечного перерізу проводів та загальні розміри генерувального та перетворювального обладнання, що збільшує витрати на створення та експлуатацію вказаного обладнання. Тому енергопостачальні організації контролюють величину реактивної потужності та зважають на її величину при розрахунках зі споживачами.

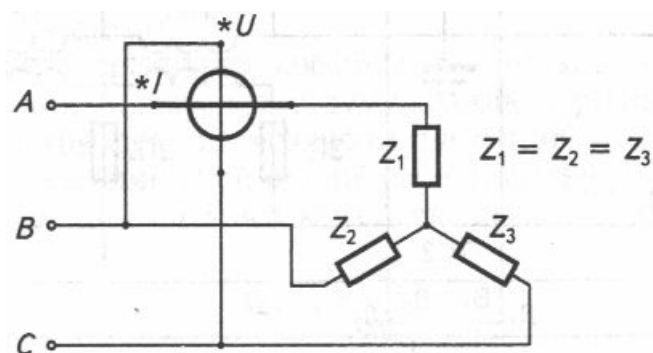


Рис. 10.7

Схема для вимірювання реактивної енергії у трифазному симетричному колі однофазним лічильником

У однофазних споживачів (наприклад, у побутових), звичайно на величину реактивної потужності не зважають і її не вимірюють. Тому однофазні лічильники реактивної енергії у цьому підручнику не розглядаються. Розглянемо лише вимірювання реактивної енергії у трифазних колах за допомогою лічильників, які за будовою майже не відрізняються від лічильників активної енергії. Відмінність полягає лише у схемі вмикання їхніх обмоток при вимірюваннях.

Необхідно, щоб при споживанні чисто активної потужності у трифазному колі показання лічильника реактивної енергії не змінювали б свої величини, тобто щоб рухома частина приладу не оберталася.

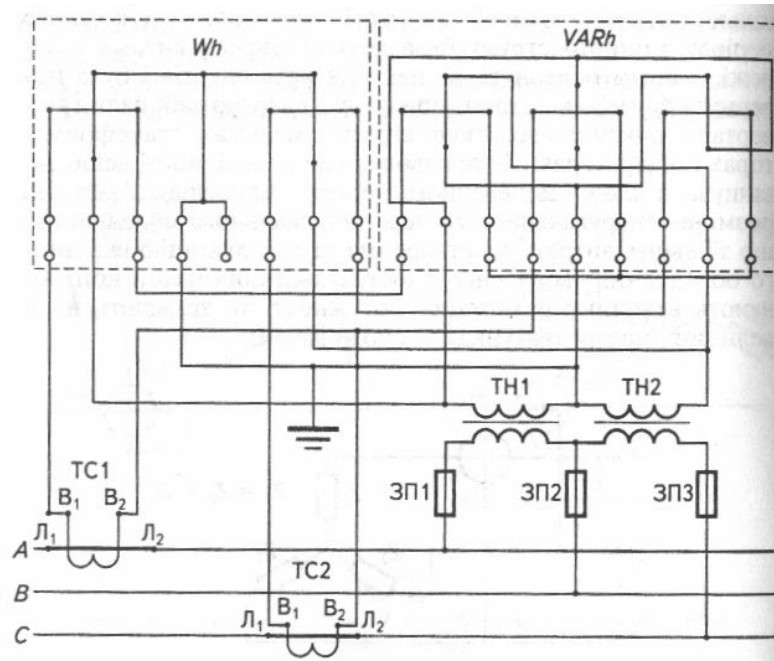


Рис. 10.8

Схема для вимірювання енергії у трифазному колі лічильниками активної і реактивної енергії з вимірювальними трансформаторами струму і напруги

У симетричному трифазному колі таке можливо при застосуванні однофазного лічильника з обмоткою струму, ввімкненою в одну фазу (наприклад, у першу), і обмоткою напруги, ввімкненою на дві інші фази (на другу й третю) так, як це зображено на рис. 10.7. Звичайно, передавальне число від осі рухомої частини цього приладу до механічного лічильника має відрізнятися від передавального числа такого самого за струмом і напругою однофазного лічильника активної енергії. Відмітною повинна бути і обмотка напруги такого лічильника, бо її ввімкнено на лінійну напругу. При вимірюванні ж активної енергії цю обмотку було ввімкнено на фазну напругу, на яку її й було розраховано.

На підприємстві, де контролюється витрата активної енергії та необхідно контролювати коефіцієнт потужності, користуються одразу двома трифазними лічильниками. Один із них вимірює споживання активної енергії, а інший — реактивної. Схему сумісного вмикання цих приладів через вимірювальні трансформатори струму і напруги, як це буває необхідним, коли і струм, і напруга у

мережі не відповідають номінальним струмам і напругам приладів, наведено на рис. 10.8.

При використанні вимірювальних трансформаторів ТН1, ТН2, ТС1, ТС2, показання лічильників слід помножити на добуток коефіцієнтів трансформації цих трансформаторів (якщо на табличках лічильників немає напису, що вони придатні до вимірювань саме з такими трансформаторами, які є у схемі).

Величину середнього коефіцієнта потужності, який за синусоїдальних напруги та струму вважають рівним косинусові кута зсуву фаз, розраховують на основі показань обох лічильників за один і той самий час. Спочатку розраховують середнє значення тангенса кута зсуву фаз:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{ср}} = \frac{W_p}{W_a},$$

де W_p — вимірювана величина реактивної енергії;

W_a — вимірювана величина активної енергії.

За визначенням тангенсом кута зсуву фаз розраховують середній коефіцієнт потужності за певний час:

$$\cos \varphi_{\text{ср}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{ср}}}}.$$

• Власне коефіцієнт потужності — це добуток косинуса кута зсуву фаз на коефіцієнт спотворення синусоїди. Але у зв'язку з тим, що на енергетичних підприємствах спотворення синусоїд напруги і струму у більшості випадків досить малі і величина цього коефіцієнта близька до одиниці, величину косинуса кута зсуву фаз ототожнюють з величиною коефіцієнта потужності.

Контрольні запитання:

1. Для чого застосовують електричні лічильники?
2. Як влаштовано індукційний лічильник енергії однофазного змінного струму?
3. Як влаштовано електродинамічний лічильник та для чого його застосовують?
4. Якими бувають трифазні лічильники енергії?
5. Чому при використанні однодискових двохелементних трифазних лічильників, при вмиканні їх у мережу, слід додержуватися певного порядку чергування фаз?
6. Що називають самоходом лічильника та як його позбутися?
7. Як можна двома лічильниками виміряти енергію у трифазному колі?
8. Якими лічильниками слід користуватись для вимірювання енергії у несиметричних трифазних колах?
9. Як за допомогою однофазного лічильника виміряти реактивну енергію у симетричному трифазному колі?

ЛЕКЦІЯ 11 ФАЗОМЕТРИ. ВИМІРЮВАННЯ ЗСУВУ ФАЗ

Однією з важливих величин, які доводиться вимірювати у колах змінного струму, як це вже було з'ясовано у попередній главі, є *коефіцієнт потужності*, котрий часто ототожнюють з величиною косинуса кута зсуву фази струму відносно фази напруги. Для оперативних вимірювань коефіцієнта потужності необхідні прилади, що безпосередньо вимірюють величину кута зсуву фаз і косинуса цього кута. Саме такими приладами є *фазометри*.

Фазометри виготовляють для вимірів як у колах однофазного змінного струму, так і у симетричних колах трифазного струму. Для вимірювань у несиметричних колах трифазного струму фазометри непридатні через невизначеність самого поняття зсуву фаз для таких кіл.

Фазометри виготовляють на основі логометричних електродинамічних, феродинамічних чи електромагнітних вимірювальних механізмів. Виробляють також і електронні фазометри.

На енергетичних підприємствах найчастіше використовують *трифазні електродинамічні і феродинамічні фазометри* як стаціонарні прилади повсякчасного користування. В лабораторних умовах найчастіше користуються електродинамічними переносними фазометрами.

11.1. Однофазні фазометри і вимірювання зсуву фаз у однофазних колах

Задля прямого вимірювання кута зсуву фаз між напру-гою і струмом частіше за все користуються *електродинамічними фазометрами*. *Стаціонарні фазометри* зразу гра-! дують у значеннях косинуса кута зсуву фаз.

Переносні лабораторні фазометри часто мають двоядну шкалу. В одному ряді позначено величину кутів зсуву фаз у електричних градусах, у іншому — косинуси кутів зсуву.

Найпростіші за будовою електродинамічні фазометри. Схему одного з таких фазометрів, ввімкненого для вимірювання косинуса кута зсуву фаз, зображено на рис. 11.1, а.

Розміщення обмоток його вимірювального механізму зображено на рис. 11.1, б. Фазометр має нерухомі котушки W_1 , котрими проходить струм контрольованої ділянки електричного кола I, та дві обмотки-рамки рухомої частини приладу, закріплені на осі разом зі стрілкою-показчиком. Дросель з індуктивністю L , конденсатор C і резистор r зсувають струми I_1 та W_2 , що проходять по обмотках-рамках P_1 і P_2 так, щоб кут зсуву між струмами I_1 та I_2 був близьким до 90° (електричних, тобто щоб один струм був зсунутий відносно іншого майже на чверть періоду синусоїди).

Якщо взаємне положення рамок і стрілки приладу буде і таке, як показано на рисунку, то кут відхилення стрілки від середнього положення буде відповідати куту зсуву фаз струму I у контрольованій ділянці кола від напруги U , прикладеної до цієї ділянки. Такий прилад, маючи позначку одиниці косинуса зсуву фаз посередині шкали, може вимірювати косинуси кутів зсуву фази струму як у бік відставання від прикладеної напруги (при індуктивному характері опору навантаження Z_H), так і у бік випередження струмом цієї напруги (при ємнісному характері опору навантаження Z_H). В останньому випадку відхилення стрілки від середнього її положення буде протилежним тому, що було при індуктивному характері опору навантаження. У подібних фазометрах, що їх виробляють в Україні, межі вимірювання косинуса

зсуву фаз найчастіше бувають від одиниці до 0, 5 (у кутових одиницях — це від нуля до 60 електричних градусів). Шкалу фазометра зображено на рис. 11.1, в.

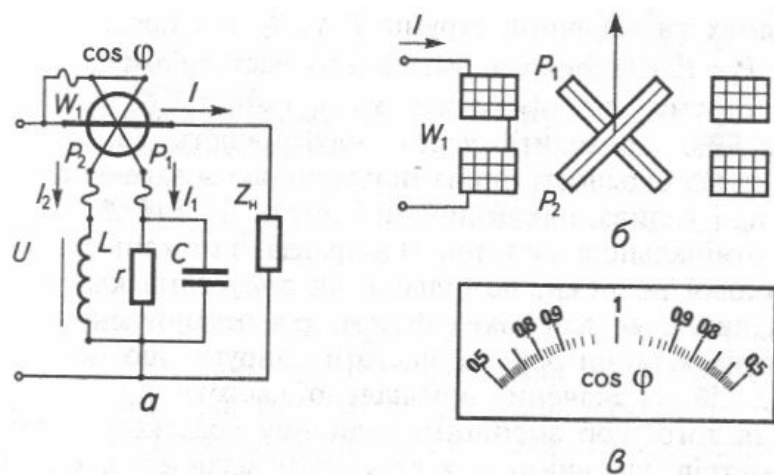


Рис.11.1

Однофазний електродинамічний фазометр:

а — принципова схема; б — будова вимірювального механізму; в — шкала

Іноді виробники фазометрів вважають доцільним виконувати у фазометрів дільниці шкали, що відповідають різним напрямам зсуву фаз, неоднаковими. Наприклад, частину шкали, що відповідає куту відставання струму від напруги, роблять приблизно на 80 % довжини всієї шкали (для показання косинусів кутів зсуву фаз від 1,0 до 0,2), а ділянку, що відповідає випереджувальним кутам зсуву, роблять на лишку (близько 20%) довжини шкали. Цього можна досягти при виробництві приладів шляхом виконання кута між рамками, відмінним від 90° , та несиметричним закріпленням стрілки приладу відносно рамок на осі фазометра.

Зауважимо, що у фазометрах, як і в усіх приладах з логометричними вимірювальними механізмами, положення стрілки відносно шкали при вимкнених приладах може бути довільним, бо ці прилади не мають пружин, які б завжди повертали стрілку приладу на певне місце, а мають "безмо-ментні" струмопідводи (їх у таких приладах три, умовно зображених на схемі біля рамок у вигляді хвилястих ліній), що створюють незначний момент протидії, сумірний з моментом від сил тертя кернів у підп'ятниках.

На показання фазометрів суттєво впливає зміна частоти напруги. Це пояснюється тим, що ця зміна впливає у різних напрямках на величини струмів I_1 та I_2 . Що проходять рамками P_1 і P_2 (наприклад, зменшення частоти зменшує величину струму, що проходить крізь ємність C , і збільшує струм, що проходить через індуктивність L). Тому на відміну від більшості інших приладів, яким гарантована робота при коливаннях величини частоти на $\pm 10\%$, порівняно з номінальною частотою (щоправда, з можливістю появи додаткової похибки, не більшої як допустима класом точності приладу), для таких фазометрів встановлено границі! допустимої зміни робочої частоти напруги, що не перевищує $\pm 1\%$ від значення номінальної частоти.

Для того щоб зменшити величину додаткової похибки фазометрів, що виникла в результаті відхилення величини частоти напруги від її номінального значення, ряд фазометрів має схему, дещо відмінну від тієї, що ми розглянули. Таку

поліпшену схему наведено на рис. 11.2. На відміну від схеми попередньо розглянутого фазометра, в цій схемі обмотку однієї з рамок виконано з двох частин P_1 і P_2 двома паралельними проводами. При цьому кінець обмотки однієї з частин з'єднується разом з початком обмотки іншої частини (на схемі початок обмотки кожної із вказаних частин помічено крапкою). Вільні кінці частин обмотки приєднано до індуктивності L і ємності C . Завдяки такому з'єднанню частин обмотки і тому, що фаза струму у вітці з індуктивністю L майже на 90° зсунута у бік відставання від фази напруги, а фаза струму в галузці з ємністю C майже на 90° зсунута у бік випередження відносно фази напруги, магніторушійні сили обох частин рамки P_1 і P_2 додаються.

Якщо ж частота напруги U з якоїсь причини змінюється (наприклад, зменшується), то величина струму, що проходить у вітці з індуктивністю, збільшиться (бо зменшиться реактивний опір індуктивності). У той самий час величина струму у вітці з ємністю зменшиться (внаслідок збільшення реактивного опору ємності). Загальна величина магніторушійної сили, створеної обома частинами рамки, майже не зміниться.

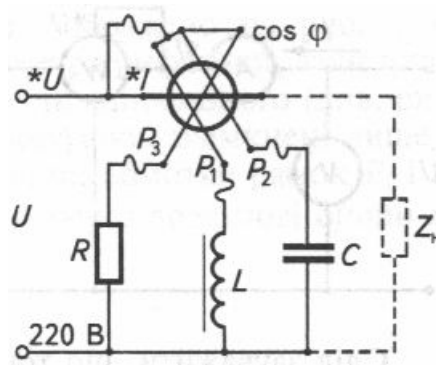


Рис. 11.2

Схема однофазного електродинамічного фазометра з компенсацією впливу зміни частоти напруги на показання приладу

Відносно ж величини струму у рамці P_3 , яку ввімкнено послідовно з активним резистором R , що має опір у багато разів більший, ніж опір обмотки самої рамки, то величина цього струму практично не залежить від величини частоти.

Таким чином, зміна частоти напруги не викликає у такому приладі зміни величини магнітної дії рамок, а отже й зміни показань фазометра.

Звичайно, цей висновок справедливий при незначних змінах величини частоти напруги. Але, в усякому разі, фазометри, виконані за цією схемою, можуть успішно працювати у межах свого класу точності при змінах величини частоти напруги до $\pm 5\%$ від номінальної.

Для визначення величини коефіцієнта потужності у однофазних колах, крім способу прямого вимірювання з допомогою фазометра, іноді користуються способом посереднього вимірювання за допомогою трьох приладів — амперметра, вольтметра і ватметра, увімкнутих за схемою, зображеною на рис. 11.3. При цьому коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) визначають розрахунком з виразу

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI},$$

де P — потужність, виміряна ватметром, Вт;

U — напруга, виміряна вольтметром, В;
 I — струм, виміряний амперметром, А.

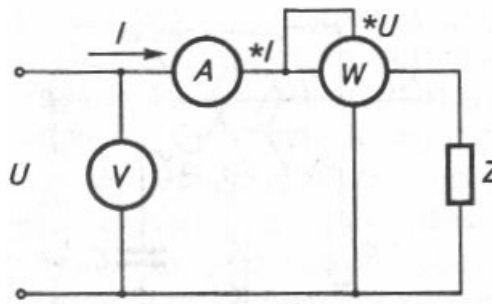


Рис. 11.3

Схема вмикання електровимірювальних приладів для посереднього визначення величини коефіцієнта потужності

Слід зауважити, що точність посереднього вимірювання коефіцієнта потужності значно нижча, ніж при прямому вимірюванні. Причинами цього є складність точного одночасного зняття показань із трьох приладів, необхідність зважати на похибки всіх трьох приладів, можливість появи додаткової кутової похибки ватметра, якщо вимірювання виконують звичайним ватметром при коефіцієнті потужності меншому, ніж 0,5, та можливість похибки при розрахунку. Саме тому посередні вимірювання коефіцієнта потужності на енергетичних підприємствах використовувати недоцільно. Такі вимірювання іноді застосовують в лабораторних умовах, де є можливим використання вимірювальних приладів підвищених класів точності (наприклад, класів 0,2 або 0,5) і проведення багаторазового вимірювання.

11.2. Трифазні фазометри. Вимірювання зсуву фаз у трифазних колах

Енергобудівні та енергопостачальні підприємства оперують електричною енергією трифазного струму і постачають її, головним чином, промисловим споживачам при однакових лінійних напругах, бо навантаження на лінії передач і електричні станції створюються в основному трифазними електродвигунами чи трифазними перетворювачами, що симетрично навантажують усі три фази ліній електропостачання. При цих умовах величини кута зсуву фаз чи косинуса цього кута можна вимірювати фазометрами, будова якого навіть простіша за будову однофазних фазометрів.

Схему *трифазного електродинамічного фазометра*, ввімкненого для вимірювання коефіцієнта потужності у трифазному симетричному колі, зображено на рис. 11.4. Незважаючи на те, що цей фазометр трифазний, конструктивне виконання його таке саме, як однофазного (див. рис. 11.1). Фазометр має послідовні котушки, ввімкнені лише у коло струму першої фази. Одні кінці обмотки рамок P_1 і P_2 приєднано до цієї фази, а інші — через додаткові опори $r_{д1}$ і $r_{д2}$ до фаз 2 і 3.

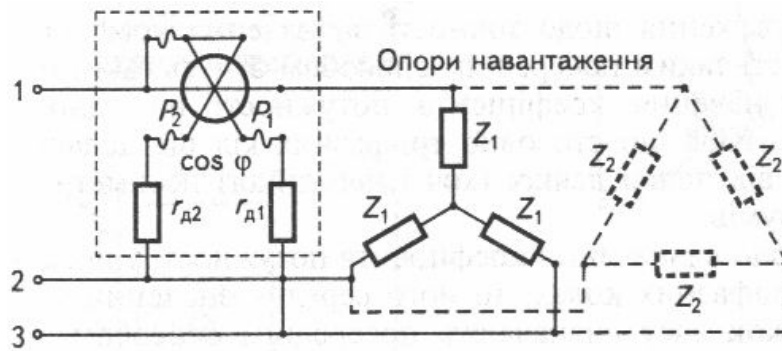


Рис. 11.4

Схема ввімкнення фазометра для вимірювання коефіцієнта потужності у трифазному симетричному колі

Відміна трифазного електродинамічного фазометра від однофазного в тому, що у нього кут між рамками становить 60° і відсутні елементи, які б створювали зсув фази струму в рамках відносно фази напруг, прикладених до їхніх кіл. У трифазному фазометрі струми рамок можуть бути в фазі з напругами, прикладеними до цих кіл, бо самі ці напруги знаходяться між собою під кутом у 60° (електричних).

Наявність ввімкнених послідовно з рамками додаткових активних опорів значної величини і відсутність у їх колах Додаткових реактивних опорів робить трифазні фазометри практично незалежними від величини частоти напруги у мережі. За аналогічними схемами побудовано і трифазні феродинамічні фазометри. Щодо електромагнітних фазометрів, то вони мають складну технологію виготовлення нерухомих обмоток та трудомісткі при складанні. Тому електромагнітні фазометри нині не виготовляються і тут не розглядатимуться.

Звичайно у трифазних симетричних колах можна розрахувати величину коефіцієнта потужності за показами трифазного ватметра, вольтметра і амперметра:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}},$$

де P — потужність, визначена ватметром, Вт;

$U_{\text{л}}$ — лінійна напруга, що є між проводами мережі, В;

$I_{\text{л}}$ — лінійний струм, що проходить проводами мережі, А.

Зауваження щодо точності визначення коефіцієнта потужності таким посереднім способом будуть такі самі, що й до визначення коефіцієнта потужності на однофазному струмі. Хіба що стосовно трифазних кіл ще додається похибка від появи деякої (хоч і невеликої) несиметрії напруг чи струмів.

Щодо визначення коефіцієнта потужності у несиметричних трифазних колах, то його середнє значення за деякий проміжок часу визначають посереднім способом за показаннями активного і реактивного лічильників електричної енергії.

11.3. Фазопоказчики та визначення порядку черговості фаз у трифазних мережах

Під час монтажу та приєднання низки поширених електровимірювальних приладів (наприклад, однодискових двохелементних трифазних лічильників)

виникає необхідність підімкнення їх до мережі з дотриманням певного порядку черговості фаз, як це рекомендовано технічним описом приладу. Прикрість при цьому полягає в тому, що в разі неправильного вибору черговості фаз у більшості випадків прилади даватимуть неточні показання (в усякому разі менш точні, ніж гарантовано класом точності приладів), але у приєднаному і введеному в дію приладі виявити це буде вже неможливо.

Для того щоб уникнути неправильного приєднання приладів чи іншого електрообладнання (наприклад, електродвигунів, забезпечивши необхідний напрям обертання роторів), треба мати прилад, що показував би порядок черговості фаз.

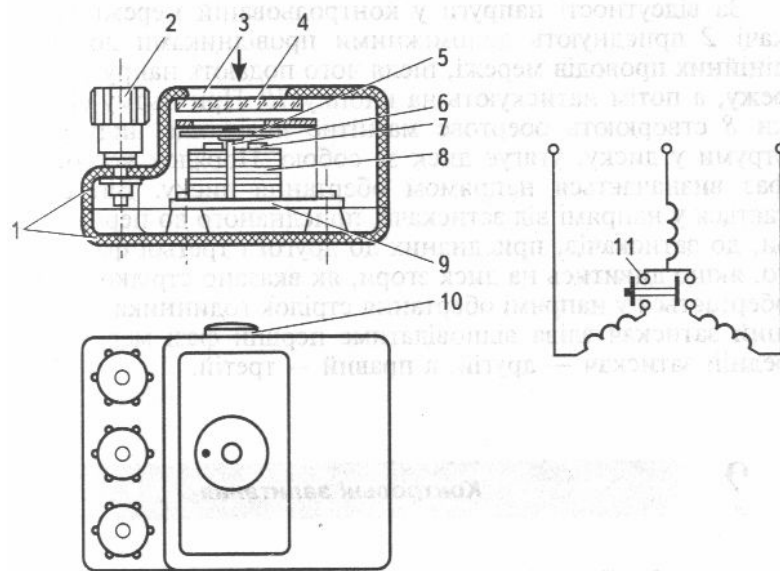


Рис. 11.5

Будова та схема фазопоказчика

Приладом, що визначає порядок черговості фаз, є *фазопоказчик*, котрий являє собою найпростіший асинхронний електродвигун із зосередженими обмотками і ротором, виконаним у вигляді диска. Будову такого фазопоказчика зображено на рис. 11.5.

Фазопоказчик складається з роз'ємного пластмасового корпуса 1, на верхній частині якого встановлено три затискачі 2, призначені для приєднання до них проводів від ме-режі, де бажано визначити порядок черговості фаз. Верхня частина корпуса має вікно 3, закрите прозорим склом 4. Під цим склом є алюмінієвий диск 5, що може вільно обертатись на осі 6, закріпленій на сталевій пластині 9, встановленій у нижній частині корпуса 1. На цій же пластині закріплено три циліндричні магнітопроводи 7 з насунутими на них котушками 8. Обмотки цих котушок одними кінцями приєднано до затискачів 2, а іншими — до пружних контактів 11, які натисканням кнопки 10 з'єднуються "зіркою". Нормальне положення фазопоказчика має бути таким, щоб його диск було розміщено горизонтально.

За відсутності напруги у контрольованій мережі затискачі 2 приєднують допоміжними провідниками до трьох лінійних проводів мережі, після чого подають напругу у мережу, а потім натискають на кнопку 10. При цьому обмотки 8 створюють обертове магнітне поле, яке, індукуючи струми у диску, утягує диск за собою. Порядок черговості фаз визначається напрямом обертання диска. Він обертається у напрямі від затискача, приєднаного до першої фази, до затискачів,

приєднаних до другої і третьої фаз. Тобто, якщо дивитись на диск згори, як вказано стрілкою, і він обертається у напрямі обертання стрілок годинника, то перший затискач зліва відповідатиме першій фазі мережі, середній затискач — другій, а правий — третій.

Контрольні запитання:

1. Що вимірюють фазометрами?
2. На основі яких вимірювальних механізмів виготовляють фазометри?
3. Чому показання однофазних фазометрів суттєво залежать від величини частоти напруги?
4. У якому положенні на шкалі перебуває стрілка, якщо фазометр не ввімкнено або за відсутності напруги в мережі?
5. Як можна зменшити залежність показань однофазного фазометра від величини частоти напруги у контрольованому колі?
6. Чому у трифазних фазометрів показання практично не залежать від частоти напруги мережі?
7. Як визначити коефіцієнт потужності однофазного кола посереднім методом?
8. Чому пряме вимірювання коефіцієнта потужності має перевагу над посереднім?
9. Для яких трифазних кіл придатні трифазні фазометри?
10. Як можна визначити середнє значення коефіцієнта потужності у несиметричному трифазному колі?
11. Для чого застосовують фазопоказчики?
12. Що являє собою фазопоказчик?
13. Як користуватись фазопоказчиком?

ЛЕКЦІЯ 12 ОММЕТРИ. МЕГОММЕТРИ. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

Вимірювання електричного опору є досить поширеним в електротехніці при виробництві багатьох видів електрообладнання, при пошуку несправностей у електрообладнанні та при його технічній діагностиці. Величина електричного опору більшості струмопровідних вузлів електрообладнання, а точніше — відхилення величини опору від її нормального значення, характеризує стан цього вузла. Це стосується обмоток збудження електричних машин, обмоток трансформаторів, обмоток більшості електричних апаратів, котушок додаткових опорів електровимірювальних приладів, ізоляції кабелів, електричних машин, трансформаторів, апаратів тощо.

На підприємствах енергетичного профілю для вимірювання опорів величиною від кількох ом до кількох кілоом часто користуються омметрами.

Мегомметрами користуються головним чином для визначення опору ізоляції як між від'єднаними від лінії енергопостачання проводами, так і між цими проводами та землею, де важлива не лише наявність ізоляції, а й величина її опору, яка не може бути меншою, ніж це дозволено нормами експлуатації та безпеки персоналу.

12.1. Омметри

- **Омметри** — це прилади для безпосереднього виміру електричних активних (омічних) опорів.

У більшості випадків омметри виконано на основі магнітоелектричного приладу — міліамперметра і вони мають власне джерело живлення — сухий елемент чи суху батарею (напругою 1,5...4,5 В). Щоб забезпечити незалежність показань від зміни величини напруги елемента чи батареї,

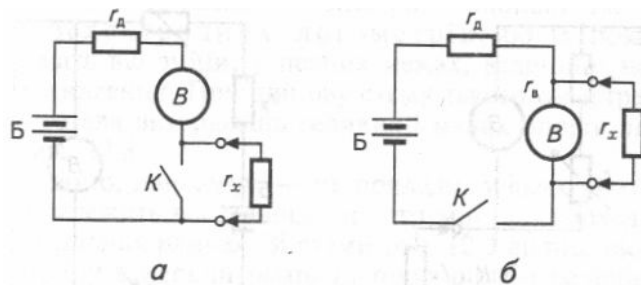


Рис. 12.1

Схеми омметрів з магнітоелектричними вимірювальними механізмами, що мають регульовані магнітні шунти: а — схема для вимірювання великих опорів; б — схема для вимірювання малих опорів

омметри мають пристрій, що встановлює нулі при відхиленні напруги джерела від номінального значення. Дві найпростіші схеми омметрів зображено на рис. 12.1. Вони призначені для вимірювань опорів r_x , значно більших за величину опору додаткового резистора r_d (рис. 12.1, а), та для вимірювань опорів r_x , сумірних з величиною r_d , і до значно менших, ніж величина опору вимірювального механізму r_b (рис. 12.1, б). В обох схемах додатковий опір r_d , що є у приладі, обмежує величину струму, який проходить через вимірювальний механізм B при замкненому ключі K та дуже малих

опорах r_x .

Якщо напруга батареї B змінилася (частіш за все зменшилась з часом), то величина струму, що проходить через вимірювальний механізм B , буде недостатньою для того, щоб стрілка приладу досягла останньої позначки шкали, яку позначено як "нуль" для схеми рис. 12.1, *а*. Тоді за допомогою регульованого магнітного шунта, який є у вимірювальному механізмі B , при замкнутому контакті K збільшують робочий магнітний потік у вимірювальному механізмі так, щоб стрілка досягла нульової позначки.

Якщо ж у приладі, схему якого зображено на рис. 12.1, *б*, напруга батареї B зменшилась, то при відімкненому опорі r_x , так само встановлюють стрілку приладу на кінцеву позначку шкали, яку позначено знаком " ∞ " (нескінченність).

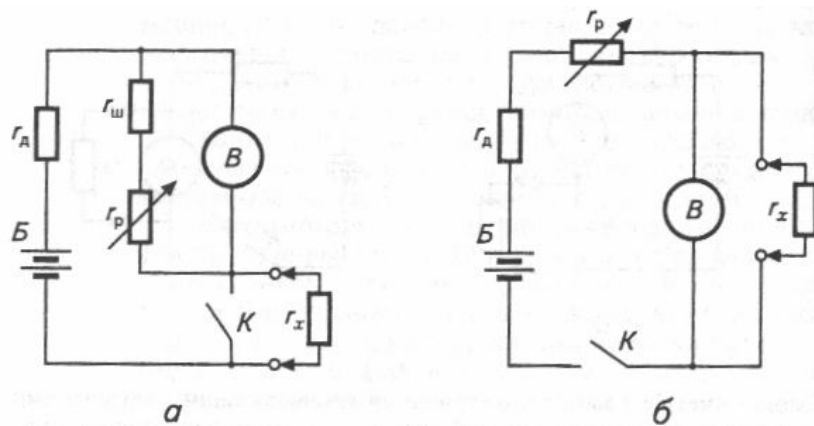


Рис. 12.2

Схеми омметрів з регульованими опорами: *а* — для вимірювання великих опорів; *б* — для вимірювання малих опорів

Виготовлення вимірювального магнітоелектричного механізму з магнітним шунтом значно ускладнює його конструкцію. Тому в більшості випадків омметри виконують на основі магнітоелектричного механізму з нерегульованим магнітним шунтом, а змінюючи величину опору регульованих резисторів, як показано на схемах рис. 12.2, прилад налаштовують на різні напруги джерела живлення.

Як і у попередньому випадку, схему рис. 12.2, *а* призначено для вимірювання величин опорів, сумірних з r_d і більших за нього, а схему рис. 12.2, *б* — для вимірювання опорів, менших за нього і за опір вимірювального механізму.

Якщо зменшилась напруга джерела живлення B , то у схемі рис. 12.2, *а*, при замкнутому контакті K (чи затискачах, позначених r_x , бо контакту A може й не бути), збільшують величину опору регульованого резистора r_p і відхилення стрілки, поки вона не встановиться на позначці "0" (нуль).

За таких самих умов, у схемі рис. 12.2, *б*, при замкнутому контакті K і відімкненому r_x зменшують величину опору регульованого резистора r_p і збільшують величину показань приладу до встановлення стрілки на останню позначку шкали, позначену як " ∞ " (нескінченність).

Більш досконалими є омметри, виконані на основі магнітоелектричних логометрів, бо їх показання не залежать від зміни, у певних межах, величини напруги джерел живлення. Принципову схему такого омметра, призначеного для вимірювань великих і малих опорів, показано на рис. 12.3.

Як відомо, *логометри* — це прилади, у яких відхилення стрілки залежить від відношення струмів, що проходять по їхніх схрещених рамках. Зі схеми рис. 12.3 видно, що величина струму в першій рамці i_{P1} пропорційна величині напруги джерела живлення, тому що опір кола цієї рамки — незмінний, бо визначається величинами опору самої рамки P_1 і величиною опору додаткового резистора r_d . Щодо струму, який проходить через другу рамку P_2 , то він пропорційний тій самій напрузі і обернено пропорційний величині вимірюваного опору r_x . Кут відхилення стрілки логометра залежить від частки поділу величини струму i_{P1} на величину струму i_{P2} , тобто буде пропорційним величині опору r_x .

Шкали омметрів градуйовані безпосередньо в омах (або кілоомах) і завжди нерівномірні. Тому клас точності цих приладів, що позначений цифрою на їхніх шкалах, відповідає найбільшій допустимій похибці вимірювань опорів у відсотках від довжини робочої частини шкали.

Точність вимірювань опорів на кінцевих (або початкових) ділянках шкал цих приладів, де поділки стиснуто між собою, надзвичайно мала. В усякому разі на цих ділянках шкали можуть виникнути похибки вимірювання опору, що досягають 5...10 % (а то й більше!) від вимірюваної величини опору.

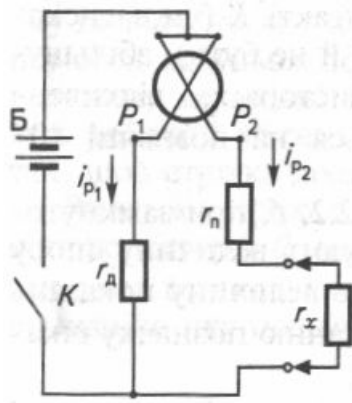


Рис. 12.3

Схема омметра, виконана на основі магнітоелектричного логометра

Крім того, при малих значеннях напруги джерел живлення (а це 1,5...4,5 В) і реальних величинах номінального струму вимірювальних механізмів (а це не менше як 50 мкА), реальні величини опорів, що вимірюються омметрами, невеликі й не перевищують 1...3 МОм (і це у кращому випадку). Це також є об'єктивним недоліком омметрів.

12.2. Мегомметри

• **Мегомметри** — це омметри для безпосереднього вимірювання дуже великих електричних опорів (більших за 10^5 Ом), наприклад, опорів ізоляції обмоток трансформаторів, електричних машин і апаратів.

Вимірювальну частину мегомметрів завжди виконують на основі магнітоелектричних логометрів, а джерелом живлення у більшості випадків є генератор напруги постійного струму з досить високою номінальною напругою (від 100 до 2500 В).

Генератор і вимірювальна частина змонтовані всередині корпуса

мегомметра. Зовні корпуса є лише приводна ручка, за допомогою якої якір генератора, через зубчасту передачу, приводиться до руху. Нормальна частота обертання ручки оператором — 120 обертів за хвилину. Відхилення від цієї частоти обертання, особливо у бік її збільшення, не призводить до суттєвої зміни напруги генератора через наявність у нього відцентрового регулятора напруги.

Принципову схему мегомметра наведено на рис. 12.4. Як видно зі схеми, за допомогою перемикача Π схему можна вмикати на два режими роботи: перший, коли вимірюваний

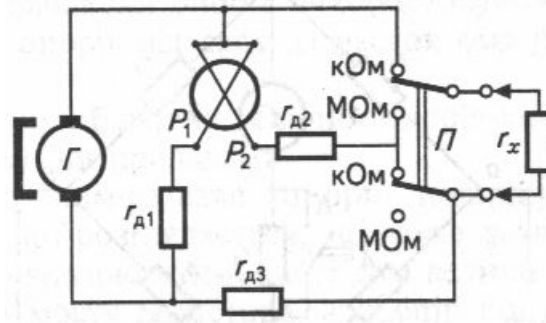


Рис. 12.4
Схема мегомметра

опір r_x буде ввімкнено послідовно з рамкою P_2 (і ще з двома резисторами $r_{д2}$ і $r_{д3}$), і другий, коли вимірюваний опір r_x буде ввімкнено паралельно до рамки P_2 з резистором $r_{д2}$. Перше положення перемикача Π відповідає вимірюванням великих опорів, а друге — вимірюванням опорів меншої величини.

Є також мегометри з живленням від мережі змінного струму, бувають і з живленням від батарей сухих елементів чи від акумуляторів з перетворювачами постійного струму низької напруги у постійний струм високої (100...2500 В).

12.3. Мостові методи вимірювання опорів

У мостових схемах опори вимірюють, порівнюючи величини вимірюваного опору з величиною зразкового опору шляхом порівняння падіння напруг на цих опорах. Схему *вимірювального моста постійного струму* для вимірювання опорів (*моста Вістона*) наведено на рис. 12.5. Вимірюваний опір r_x , величина якого невідома, ввімкнено в четверте плече моста, а в перше плече — зразковий регульований опір. Якщо величини опорів r_2 і r_3 рівні між собою, то величина регульованого опору r_1 має бути не меншою, ніж величина вимірюваного опору. Джерело живлення B (батарей, акумулятор, випрямляч) тут уміщено в першу діагональ мосту ($a — в$), а в другу ($б — з$) — індикатор нуля (магніто-електричний гальванометр Γ).

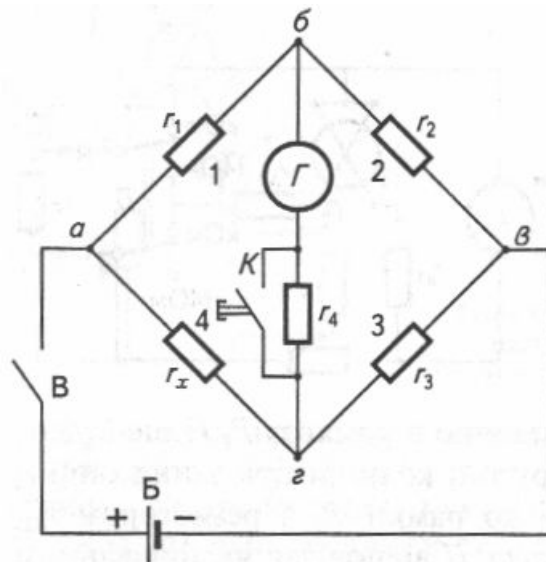


Рис. 12.5

Схема мосту для вимірювання опорів

Змінюючи величину опору r_1 , досягають такої напруги між точками a , $б$, як і між точками a , $г$. Спочатку врівноваження величини цієї напруги виконують при наявності у колі гальванометра G резистора r_4 , що зменшує чутливість гальванометра до напруги між точками $б$ і $г$. Це робиться для того, щоб захистити гальванометр від відносно великих для нього напруг, які матимуть місце, поки міст не збалансовано. Коли ж відхилення стрілки гальванометра зменшаться, що свідчить про підхід до стану рівноваги мосту, натискають кнопку K і замикають резистор r_4 , тим самим збільшуючи чутливість гальванометра G , і останніми декадами магазину зразкового опору r_1 ще дещо змінюють величину цього опору, досягаючи відсутності показань гальванометра G вже без опору r_4 . Це і буде стан рівноваги мосту.

За умови, коли $r_2=r_3$, при цій рівновазі величини опорів r_1 , і r_x будуть дорівнювати один одному. Тобто величину опору r_x можна визначити з положення ручок зразкового магазину опорів r_1 .

Щоб розширити діапазон вимірювання опорів таким мостом, доцільно опір r_3 зробити ступінчасто-змінним (у 10, 100, 1000 разів). При цьому з'являється можливість вимірювання опорів r_x у 10, 100, 1000 разів відмінних від того, коли r_2 і r_3 дорівнювали один одному. При цьому, звичайно, величина струму у плечах 3 і 4 буде значно відмінною від попередньої (коли $r_2=r_3$).

Подібні мости для вимірювання опорів використовують для вимірювання величин опорів від десятих часток ома й до 100 000 Ом.

Для вимірювання менших і більших величин опорів користуються іншими схемами чи приладами.

Так, якщо необхідно вимірювати опори порядку $0,1 \dots 0,0001$ Ом, то схема, що розглядається, не може дати задовільних результатів, бо вимірюватиме не тільки величину опору, приєднаного до мосту резистора, а й опір контактів та проводів, якими цей резистор приєднано до мосту. Наявність цих опорів суттєво знижує точність вимірювання.

Вказаний недолік мостової схеми відсутній у разі вимірювання малих опорів

подвійним мостом {мостом Томсона), схему якого наведено на рис. 12.6. Вимірюваний малий опір r_x на цій схемі приєднано до схеми мосту за допомогою чотирьох затискачів 1...4. Затискачі 1 та 4 призначено для вмикання резистора у коло струму, а 2 та 3 — для зняття падіння напруги з тієї частини опору, котра саме вимірюється. В схему ввімкнено зразковий опір r_{3p} , загальна величина якого незмінна, але опір його середньої частини r може змінюватись при переміщенні по ньому рухомого контакту A . У схему введено гальванометр G , приєднаний до потенційних затискачів 2 і 3 вимірюваного опору через два однакових резистори r_1 і r_2 величиною, що значно перевищує як величину вимірюваного опору r_x , так і величину зразкового опору r_{3p} , виконаного переважно у вигляді реохорда. Гальванометр G також приєднано до зразкового опору двома однаковими за величиною резисторами r_3 і r_4 , величина яких звичайно буває більшою за величину резисторів r_1 і r_2 у 10, 100 і 1000 разів.

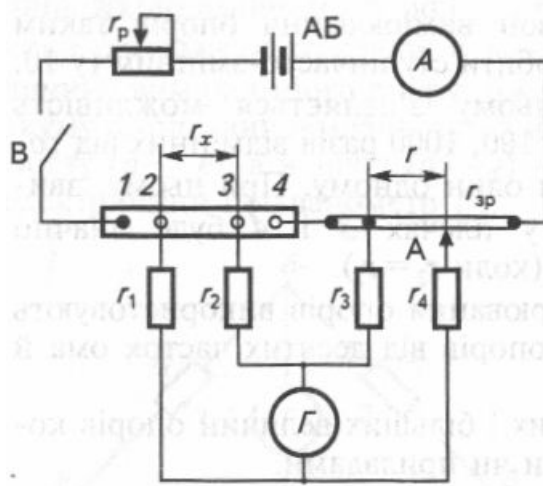


Рис. 12.6

Схема вимірювання малих опорів подвійним мостом

На відміну від мосту Вістона, який може житися від кількох сухих елементів, подвійний міст живиться від джерела АБ (від акумулятора чи випрямляча), розрахованого на досить значний струм, наприклад до 10...20 А. Значні струми необхідні для того, щоб при вимірах опорів малих величин одержувати на цих опорах істотну величину падіння напруги, достатню для надійної роботи гальванометра G , приєднаного до схеми через додаткові резистори r_1 , r_2 , r_3 , r_4 . Величина робочого струму мосту встановлюється регульованим резистором r_p .

За допомогою мостів постійного струму можна вимірювати величини опорів від 10^6 до 10^6 Ом (менші величини опорів вимірюють подвійними мостами, більші — а одинарними).

Промисловість виробляє і комбіновані мости, які можна і перемикає на вимірювання за різними схемами (як за подвійною, так і за одинарною). У більшості випадків такі мости мають різні класи при вимірах різних величин опорів, наприклад: клас 0,2 — для опорів величиною від 0,01 до 10 000 Ом і клас 5 — для вимірювань менших і більших опорів.

12.4. Вимірювання дуже великих опорів

При вимірюваннях, що пов'язані з випробуваннями ізоляційних матеріалів, виникає необхідність у вимірюваннях дуже великих опорів, величина яких значно перевищує (часто на декілька порядків) найбільші величини опорів, вимірюваних мостами. Така необхідність виникає, наприклад, при розробках ізоляторів, на яких закріплюють частини ліній електропередач, що перебувають під високою напругою. Слід зазначити, що у більшості випадків немає потреби в скільки-небудь високій точності від таких вимірювань.

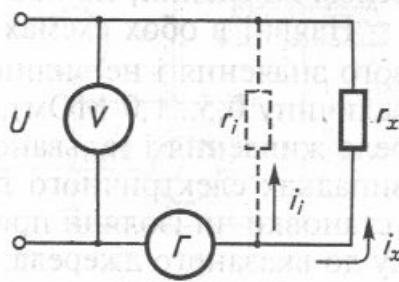


Рис. 12.7

Схема, що пояснює вплив опору ізоляції проводів на вимірювання опору значної величини

У подібних випадках застосовують посередній вимір опору за допомогою вольтметра і гальванометра, який здатний відчувати надзвичайно малі струми, що проходять через ізоляційний матеріал. Але при цьому виникає проблема, а саме: як запобігти впливові на вимірювання побічних струмів, що не проходять через вимірюваний опір, але враховуються вимірювальними приладами. Схему, що пояснює вплив сторонніх струмів на вимірювання опору, показано на рис. 12.7.

Якщо до джерела напруги U , контролюваного вольтметром V , приєднати через гальванометр G вимірюваний великий опір r_x , то на результати вимірювання величини струму в опорі r_x , безпосередньо впливає струм i_i , що проходить через опір ізоляції r_i між проводами, якими вимірюваний опір приєднано до вимірювальної схеми. Якщо опір r_i сумірний з величиною r_x (а якщо r_x , дуже великий, то опір r_i може бути навіть меншим за нього), і величина струму, вимірюваного гальванометром G , може бути настільки відмінною від величини i_x , що наступний розрахунок величини r_x через напругу, що показує вольтметр V , і струм, що показує гальванометр G , втрачає сенс через наявність істотної похибки, величина якої не може бути визначена.

Необхідно, щоб при подібних вимірюваннях струм, що не проходить через вимірюваний опір, не проходив би через гальванометр. Цього можна досягти раціональним екрануванням проводів і частин вимірювальної схеми.

Схеми вимірювання об'ємного та поверхневого опорів зразка ізоляційного матеріалу, що запобігає взаємному впливові цих опорів при вимірюванні, показано на рис. 12.8. Схеми також усувають вплив величини ізоляції проводів, що з'єднують випробувальне устаткування з джерелом живлення, на наслідки вимірювань.

Наявні в обох схемах резистори r_B не мають принципового значення і не впливають на вимірювання (хоч і мають величину 0,5...1,0 МОм), а слугують лише для захисту джерела живлення і гальванометра від появи значних струмів у випадках електричного пробоя ізоляції експериментальної установки чи ізоляції

проводів, що приєднують цю установку до вказаного джерела. На схемах позначено: r_B — баластний резистор, V — вольтметр, Γ — гальванометр, E — екран, ВЕ — верхній електрод, НЕ — нижній електрод, ОК — охоронне кільце, ВМ — випробовуваний ізоляційний матеріал.

При вимірюваннях без екранування струм, що споживався вимірювальною установкою, проходив би так, як показано на рис. 12.8, *в*, тобто і через об'єм ізоляції (i_o), й по її поверхні (i_n). Через гальванометр у цьому разі тече і струм, що проходить по поверхні зразка ізолятора i_d , і струм, що проходить через його об'єм i_o , і струм, що проходить через ізоляцію проводів, що підводять напругу до експериментальної установки. При цьому неможливо визначити ні питомий об'ємний опір ізоляції, ні питомий поверхневий опір.

Використовуючи схему рис. 12.8, *а*, можна позбутися недоліків простої схеми вмикання електродів.

Заекранувавши провід, що йде від нерухомого електрода НЕ, встановивши охоронне кільце ОК та з'єднавши їх з негативним полюсом джерела живлення, відводять і струми витікання, і струм i_x , що йде по поверхні зразка ізолятора ВМ (випробовуваного матеріалу), від гальванометра Γ , завдяки чому через цей гальванометр проходить тільки той струм i_o , який проходить через об'єм матеріалу, обмежений, з одного боку, площею верхнього електрода ВЕ, а з іншого — нижнім електродом НЕ. Вважають, що у цьому випадку струм проходить через об'єм, що дорівнює добутку з площі верхнього елемента на товщину зразка ізоляційного матеріалу.

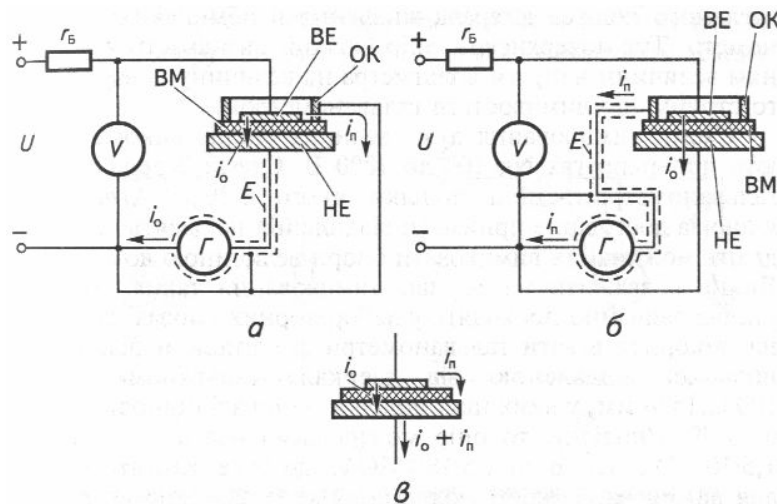


Рис. 12.8. Схеми для вимірювання об'ємного та поверхневого опорів ізоляційних матеріалів

Насправді, через наявність деякого розтікання струму по зразку ВМ струм i_o охоплюватиме дещо більший об'єм, але це буде несуттєвим при значній величині відношення діаметра верхнього електрода до товщини зразка.

При подібних випробуваннях ізоляційних матеріалів вважають, що величина виміряного об'ємного опору дорівнює частці від ділення величини напруги, яку показує вольтметр V , на величину струму, що її показує гальванометр Γ .

Для вимірювання поверхневого опору випробовуваного ізолятора користуються схемою рис. 12.8, *б*, де гальванометр Γ вимірює лише струм, що

проходить по поверхні ізоляційного матеріалу між зовнішнім нижнім краєм верхнього електрода ВЕ і внутрішнім нижнім краєм охоронного кільця. Струм, що проходить крізь об'єм ізоляції, ϵ (на рисунку він показаний як i_o), але він не проходить через гальванометр і не спотворює результати вимірювань.

У цій схемі наявні й струми витікання, але й вони потрапляють лише на екранну оболонку проводу, що з'єднує охоронне кільце ОК з гальванометром Г, а потім — до негативного полюса джерела живлення й обминають гальванометр. Тут поверхневий опір ізоляції визначається діленням величини напруги вольтметра на величину поверхневого струму, що вимірюється гальванометром.

Схеми вимірювання дуже великих опорів використовують при напругах від 100 до 1000 В. Схеми з переносним гальванометром, ціна поділки якого $1 \cdot 10^{-8}$ А/поділку, якщо за достовірне приймати відхилення на десять поділок, дають можливість вимірювати опори величиною до 10^{10} Ом. Якщо ж зважити на те, що вимірювання таких великих опорів звичайно проводять у лабораторних умовах, де можна використовувати гальванометри зі світловим відліком і шкалою, віддаленою від дзеркала гальванометра на 1000...1500 мм, у яких ціна поділки на шкалі становить десь $6 \cdot 10^{-10}$ А/поділку, то опір можна вимірювати до величин $1,5 \cdot 10^{11}$ Ом, тобто до $1,5 \cdot 10^5$ МОм, що буде забагато навіть для вимірювань якості ізоляції для яких заведено випадків, що трапляються в енергетиці.

12.5. Визначення величини опору методом амперметра і вольтметра

Величину опору можна визначити простим *посереднім способом* — *розрахунком за показаннями амперметра і вольтметра*. Амперметр вимірює струм, що проходить по резистору, опір якого необхідно визначити, а вольтметр — напругу, за якої цей струм було одержано.

Можливі схеми для виконання таких вимірювань наведено на рис. 12.9. При вимірюванні за обома схемами величина вимірюваного опору

$$r_x = \frac{U}{I},$$

де U — вимірювана напруга, В;

I — виміряний струм, А.

У випадках, коли вимірювання проводять при напругах у десятки вольт, а величиною падіння напруги на опорі амперметра нехтують, слід застосовувати схему, зображену на рис. 12.9, а. Якщо ж величина опору r_x несумірно менша за величину опору вольтметра, то слід застосувати схему рис. 12.9, б.

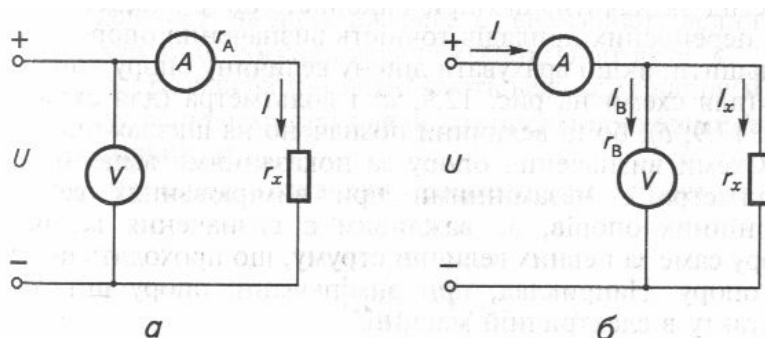


Рис. 12:9

Схема для визначення величини опору з допомогою амперметра і вольтметра

Якщо вимірюють напруги електростатичним вольтметром (а це буває, коли вимірювані напруги сягають десятків, а то й сотень вольт), безумовно використовують схему, зображену на рис. 12.9, б без будь-яких застережень, бо такі вольтметри зовсім не споживають струму. Використання магнітоелектричних вольтметрів, що споживають струми 1...5 мА, поряд з амперметрами на 2,5... 5 А, також дають можливість проводити вимірювання, не враховуючи відгалуження струму у вольтметр.

Слід зауважити, що наведені схеми придатні в основному для вимірювань, коли точність визначення величини опору може бути відносно невеликою, бо при підрахунках можливі декілька похибок: амперметра, вольтметра і неодноразового зняття з них показань (бо за час спостереження оператором за кількома приладами можлива зміна напруги джерела живлення, яка при малій величині цієї зміни може залишитись непоміченою). Крім того, наведені схеми прості лише у вимірювальній частині. Насправді ж, коли величина опору r_x , невідома навіть приблизно, між джерелом живлення і вимірювальною схемою має бути ввімкнений пристрій для регулювання напруги, що подається на схему. В разі відсутності такого пристрою, коли величина опору r_x істотно менша за очікувану, можливе пошкодження як амперметра, так і джерела живлення значним струмом, споживаним вимірюваним опором r_x . Можливе пошкодження і самого вимірюваного опору.

Слід зазначити, що при використанні у наведених схемах переносних приладів точність визначення опору можна збільшити, якщо врахувати дійсну величину опору амперметра (для схеми на рис. 12.9, а) і вольтметра (для схеми на рис. 12.9, б), бо ці величини позначено на шкалах приладів.

Схеми визначення опору за показаннями амперметра і вольтметра є незамінними при вимірюваннях величин нелінійних опорів, де важливим є визначення величини опору саме за певних величин струму, що проходять по цьому опору. Наприклад, при вимірюванні опору щіткового контакту в електричній машині.

12.6. Вимірювання опорів за допомогою вольтметра

Існує досить простий спосіб визначення величини активного опору будь-якого резистора за допомогою одного вольтметра з відомою величиною власного опору.

У переносних вольтметрів величину цього опору завжди показано на шкалі. Якщо вольтметр має декілька границь вимірювання, то величина його опору позначається для кожної з цих границь.

Для проведення вимірювань складають схему, яку показано на рис. 12.10. Резистор, опір якого вимірюється, приєднують до джерела живлення (простіше за все — до мережі постійного або змінного струму) послідовно з вольтметром, що має величину опору r_B . Паралельно з резистором приєднано вимикач K (який зазвичай: хоч освітлювальний, хоч кнопковий).

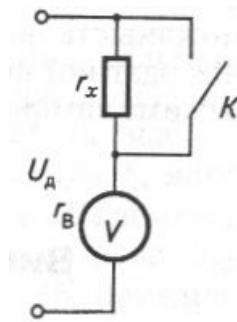


Рис. 12.10

Схема для визначення величини опору за допомогою вольтметра

При наявності напруги джерела U_d , визначають величину цієї напруги при замкненому положенні контакту K . Далі цей контакт розмикають і визначають величину напруги U_B , яку показує вольтметр при наявності послідовно ввімкненого з ним резистора r_x .

Величину опору визначають розрахунком з простого виразу:

$$r_x = r_v \left(\frac{U_d}{U_B} - 1 \right).$$

Цей спосіб вимірювання величини опору дає достатню для практичного використання точність, якщо величина напруги джерела живлення становить 60...100 % від верхньої границі вимірювання вольтметра V і якщо вимірюваний опір r_x має величину від 1/10 до три- або чотирикратної величини опору вольтметра r_v . Крім того, вкрай необхідно, щоб у процесі вимірювання напруга джерела живлення U_d була незмінною. Саме тому при живленні від мережі такі вимірювання доцільно виконувати кілька разів, але ні в якому разі не виконувати їх при живленні від джерел живлення дуже малої потужності, напруга яких може змінюватись після розмикання контакту K , коли контроль за величиною напруги джерела вже втрачено, а вона стала більшою через зменшення навантаження на джерело.

Зауважимо, що у багатьох випадках, застосовуючи спосіб вимірювання опорів, за допомогою вольтметра можна одержати кращі результати, ніж при застосуванні приладу, що призначений саме для вимірювань опорів. Так, працюючи з багатофункціональним тестером, що може вимірювати величини напруг і опорів, застосування цього способу дає можливість вимірювати опори значно більшої величини, ніж здатний вимірювати цей же прилад, якщо він працює в режимі вимірювання опорів.

12.7. Вимірювання величини опору заземлення

Величина опору заземлення дуже важлива з міркувань безпеки роботи персоналу як на підприємствах енергетичного профілю, так і на всіх промислових підприємствах, у будівництві та сільському господарстві. Необхідно, щоб величина опору заземлення не була більшою за ту, що передбачена правилами безпеки на кожному підприємстві.

Величина цього опору періодично контролюється як енергетичними службами підприємств, так і інспекційними органами.

Одним з методів визначення величини опору заземлення є *метод амперметра і вольтметра*. Схему для визначен-

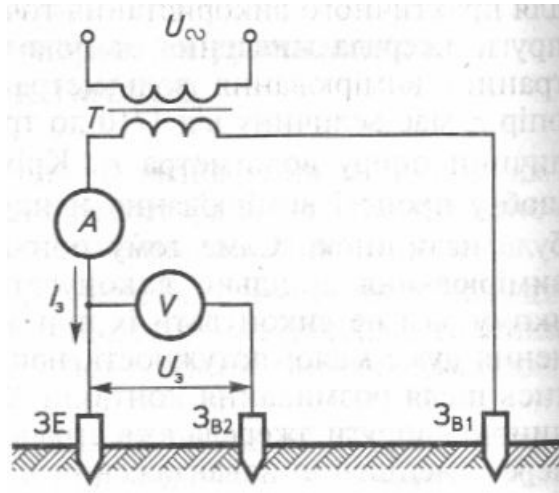


Рис. 12.11
Схема для визначення опору заземлення

ня опору заземлення таким методом наведено на рис. 12.11. Для запобігання впливу на вимірювання поляризації у місцях контакту заземлювача з ґрунтом та впливу струмів від пристроїв катодного захисту трубопроводів, прокладених неподалік від місця заземлення, всі вимірювання, що проводяться для визначення опору заземлення, виконують на змінному струмі.

При живленні вимірювальної схеми від знижувального трансформатора T у колі заземлюючого електрода $3E$ і допоміжного електрода $3B_1$, що встановлюється на відстані близько 50 м від електрода $3E$, визначається струм I_3 який вимірюють амперметром A . Між заземлювачем $3E$ і землею, за допомогою ще одного вимірювального електрода $3B_2$, розташованого на відстані 20 м від електрода $3E$, приєднано вольтметр V , що вимірює напругу U_3 між землею й електродом $3E$.

Величину опору заземлення R_x визначають як частку від ділення напруги на струм вимірювального кола:

$$R_x = \frac{U_3}{I_3}.$$

Зазначимо, що наявність додаткового опору між землею і електродом $3B_2$ зменшує показання вольтметра, через що меншою може бути і розрахована величина опору заземлення. Зменшити похибку, одержану через наявність цього додаткового опору невизначеної величини, можна, якщо використовувати при вимірюваннях вольтметр з малим струмом власного споживання, наприклад електростатичний.

У польових умовах, де відсутня мережа змінного струму, від якої б живився трансформатор T , для вимірювань величини опору заземлення користуються логометричним вимірювачем опору, що має власний генератор, подібний тому, що є у мегомметрі. Такий вимірювач опору заземлення приєднують до заземлювача також за допомогою двох допоміжних заземлювальних електродів, як це було у схемі, що наведена на рис. 12.11. Перевага застосування логометричного вимірювача у тому, що він показує величину опору заземлення безпосередньо в омах (без будь-яких розрахунків) та має власний генератор, що приводиться до руху, як і у мегомметрі, людиною, котра виконує вимірювання.

Контрольні запитання:

1. Яким чином у омметрах компенсують вплив на вимірювання опорів зміни напруги джерела живлення вимірювальної схеми?
2. У чому основна перевага омметра, виконаного на основі магнітоелектричного логометричного вимірювального механізму, порівняно з іншими омметрами?
3. На які напруги виконують мегомметри та на виміри яких величин опорів вони розраховані?
4. Від чого залежить точність мосту Вітстона?
5. Для чого застосовано гальванометри у мостових схемах?
6. Яким чином у подвійному мості для вимірювань малих опорів позбулися впливу на результати вимірювань перехідних опорів контактів у місцях приєднання вимірюваного опору до мосту?
7. Приблизно в яких межах можна вимірювати величини опорів мостами?
8. Як якість ізоляції приєднувальних проводів впливає на точність вимірювання дуже великих опорів?
9. Що застосовують у схемах вимірювання дуже великих опорів, щоб позбутись впливу опору ізоляції приєднувальних проводів на результати вимірювань?
10. Які вади має спосіб визначення величини опору за показаннями амперметра і вольтметра?

ЛЕКЦІЯ 13 МІКРОФАРАДМЕТРИ. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ

Вимірювання електричних ємностей досить часто застосовуються на енергетичних підприємствах. За допомогою вимірювання величини ємності кабелю можна досить точно визначити місце його обриву. За допомогою вимірювання ємності можна на відстані визначити місце пошкодження високовольтної лінії електропередачі. Періодичне спостереження за змінами величини втрат у ємностях кабелів, обмоток електричних машин і трансформаторів дає змогу прогнозувати наразі пошкодження електричної ізоляції цих об'єктів, аби своєчасно вжити заходів для попередження аварій з довготривалим строком відновлення аварійних об'єктів. Вимірювання ємностей також необхідні при ремонтах приладів чи апаратів, у складі яких передбачено встановлення чи заміну ємностей певної величини.

У більшості випадків величини ємностей визначають шляхом вимірювання їх у мостових схемах змінного струму. Але у певному діапазоні величин ємностей їхні величини зручно визначати за приладами прямого відліку, де величина ємності зчитується прямо з показання приладу.

13.1. Мікрофарадметри та їх використання для вимірювань величин ємностей

• **Мікрофарадметр** — це прилад для прямого вимірювання величин ємностей. Ці прилади у тих виконаннях, які поширені в Україні, здатні вимірювати величини ємностей від десятих часток мікрофаради й до десятків мікрофарад.

Мікрофарадметри виконують на основі електроди-, намічного чи електромагнітного логометра.

Принципову схему вимірної частини електродинамічного мікрофарадметра зображено на рис. 13.1. На цій схемі обмотка нерухокої котушки приладу W_H послідовно з'єднана з конденсатором C_1 й приєднана до мережі змінного струму. Обмотку рамки рухокої частини логометра W_1 через конденсатор C_2 також приєднано до мережі. Конденсатор, величину ємності якого вимірюють C_x , увімкнений послідовно з обмоткою іншої рамки логометра W_2 і їхнє коло також приєднане до мережі.

Рамки W_1 і W_2 жорстко зкріплені між собою та з віссю рухокої частини, на осі також закріплено стрілку. Струм до рамок W_1 і W_2 проходить через три "безмоментних" струмопідводи.

Через наявність малих опорів всіх обмоток логометра, струми в усіх трьох його обмотках по фазі майже збігаються між собою, і величини обертових моментів, створених взаємодією струмів I_1 та I_2 , а також I_1 та I_3 залежать від величини цих струмів. Самі ж величини струмів залежать від величини прикладеної напруги U (а це напруга мережі) і від величини реактивних опорів конденсаторів, увімкнених послідовно з обмотками. Конденсатори C_1 і C_2 вмонтовано в прилад, і величини їхніх ємностей незмінні. Тобто незмінними, при незмінній напрузі мережі, є і струми I_1 та I_2 . Що ж до струму I_3 , то його величина повністю визначається величиною реактивного опору ємності вимірюваного конденсатора C_x , і буде тим більшою, чим більшою є величина цієї ємності.

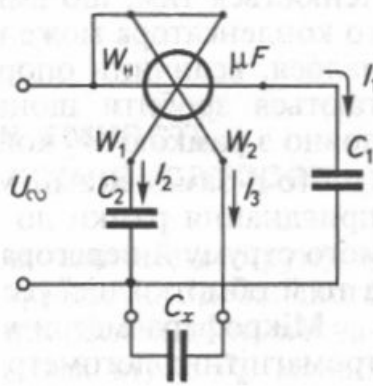


Рис.13.1

Принципова схема електродинамічного мікрофарадметра

Рамка W_2 створює діючий обертальний момент, величина якого буде тим більшою, чим більшою є величина ємності конденсатора C_x . Рамка W_1 , по витках котрої проходить струм, що визначається величиною ємності конденсатора C_2 , створює момент протидії, який залежить також і від величини кута повороту рухомої частини приладу. Зі збільшенням кута між стрілкою, закріпленою на рухомій частині приладу, і нульовою позначкою шкали момент протидії цієї рамки збільшується.

Рухома частина приладу, після його вмикання, стане нерухомою саме тоді, коли обертальний момент дії, створюваний рамкою W_2 , дорівнюватиме моменту протидії рамки W_1 . При цьому стрілка приладу вказуватиме на відмітку шкали, що відповідає величині ємності вимірюваного конденсатора C_x .

Зміна величини напруги мережі, до якої підімкнено прилад (звичайно — у межах допустимого), має не викликати зміни показань приладу, бо однаково впливає на струми в усіх трьох вітках приладу, тобто й на величини обертових моментів дії і протидії. Це не спричиняє появи різниці між моментами у положенні стрілки (і рухомої частини) приладу, що відповідає величині вимірюваної ємності. Тобто результати вимірювань ємності дійсно не залежать від величини напруги мережі.

Схема мікрофарадметра, що розглядається, спрощена й показує лише принцип дії приладу. Реальна схема, змонтована у приладі, має ще пристрій для попередньої перевірки відсутності пробоя ізоляції конденсатора, величину ємності якого потрібно виміряти. Необхідність такої перевірки пояснюється тим, що вмикання для вимірювання несправного конденсатора може вивести прилад із ладу. Як вже зазначалося, величини опорів рамок у подібних приладах намагаються зробити щонайменшими. Тому вмикання послідовно з рамкою W_2 конденсатора з пошкодженою ізоляцією (тобто з замкненими між собою електродами) призведе до приєднання рамки до повної напруги мережі, появи значного струму й перегорання "безмоментних" струмопідводів, а то й обмотки цієї рамки.

Мікрофарадметри виготовляють також і на основі електромагнітних логометрів. За схемою вони простіші за ті, що виконані на основі електродинамічних логометрів, бо не мають ні обмоток на рухомій частині приладу, ні "безмоментних" струмопідводів.

Як електродинамічні, так і електромагнітні мікрофарадметри розраховано на обмежену точність вимірювань ємності (звичайно — не вище класу 1,0).

Вада всіх мікрофарадметрів, що полягає у неможливості вимірювань ємностей значних величин, частково може бути зменшена, якщо застосовувати

вмикання вимірюваної ємності значної величини (щоб її величина була не більшою за номінальну ємність, вимірювану мікрофарадметром, у 4...5 разів) послідовно зі зразковим конденсатором величини, близької до номінальної величини ємності, вимірюваної цим приладом.

При вмиканні такого послідовного кола на вимірювальні і затискачі мікрофарадметра, величину невідомої ємності C_x , можна розрахувати за виразом

$$C_x = \frac{C_3 \cdot C_n}{C_3 - C_n},$$

де C_3 — величина зразкової ємності;

C_n — величина ємності, яку показує прилад.

Звичайно, при такому вимірюванні похибка буде значно більшою, ніж величина основної похибки мікрофарадметра.

Слід застерегти користувачів від неправильного використання мікрофарадметрів при вимірюваннях величин ємності електролітичних конденсаторів. Здебільшого ці конденсатори — однополярні й призначені для роботи лише на постійному струмі, а вимірювання мікрофарадметром виконується на змінному струмі.

13.2. Визначення величин ємності та діелектричних втрат у конденсаторах

При роботі в електричних полях змінного струму у діелектриках виникають втрати потужності. Здебільшого вони йдуть на розігрів діелектрика й прилеглих до нього частин електроустаткування. Величину цих втрат $P_{вт}$ можна підрахувати за досить простим виразом (якщо електричне поле в діелектрику буде рівномірним):

$$P_{вт} = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

де U — напруга, що створює електричне поле в діелектрику;

ω — кругова частота напруги;

C — ємність ділянки діелектрика, до якої з обох боків прикладено напругу, що створює в ньому рівномірне електричне поле;

$\operatorname{tg} \delta$ — тангенс кута діелектричних втрат.

Якщо з визначенням величин напруги, частоти і ємності все ясно, то спосіб визначення величини $\operatorname{tg} \delta$ досі ще був невідомий. Виявляється, що цю величину можна визначати поряд із величиною ємності вимірювальними мостами, схеми яких зображено на рис. 13.2 та 13.3.

При вимірюваннях за схемою рис. 13.2 та при повній рівновазі мосту (коли $r_1 = r_2$)

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_3 r_3.$$

При вимірюваннях за схемою рис. 13.3 і при аналогічній умові

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_3 r_3}.$$

При вимірюваннях за обома схемами величина вимірюваної ємності $C_x = C_3$, якщо величина $\operatorname{tg} \delta$ не занадто велика.

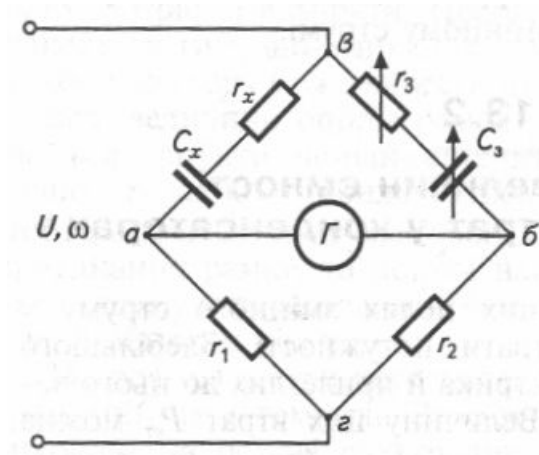


Рис. 13.2

Схема моста для вимірювання величин ємностей конденсаторів, що мають малі діелектричні втрати

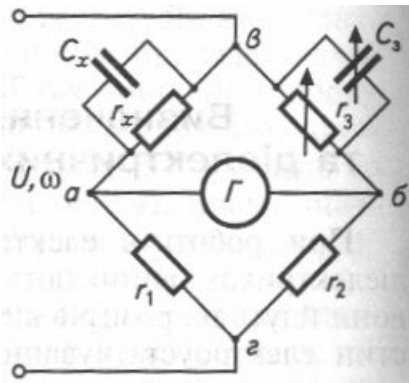


Рис. 13.3

Схема моста для вимірювання величин ємностей конденсаторів, що мають значні діелектричні втрати

Зауважимо, що наявність власних діелектричних втрат у зразковому конденсаторі C_3 дещо зменшує точність визначення величини $\text{tg} \delta$. Для більш точного визначення цієї величини слід застосовувати спеціальні мости вимірювання діелектричних втрат, де користуються спеціально виконаними зразковими конденсаторами, які практично не мають діелектричних втрат. Крім того, ці мости здатні виконувати вимірювання при високих напругах, а то й при різних їхніх частотах, що дуже важливо для достовірності вимірювань, бо величина кута діелектричних втрат залежить як від величини напруженості електричного поля, так і від величини частоти електричної напруги.

Контрольні запитання:

1. Назвіть методи і засоби, за допомогою яких можна вимірювати величини ємностей.
2. Що таке мікрофарадметр?
3. На основі яких вимірювальних механізмів виконують мікрофарадметри?

4. Чому показання мікрофарадметра мають незначну залежність від величини напруги живлення?
5. На якому струмі працюють прилади і мостові схеми для вимірювання величин ємностей?
6. Якими індикаторами нуля користуються при врівноважуванні мостів, що вимірюють величини ємностей?
7. У яких випадках для вимірювання величин ємностей користуються мостами, де врівноважувальні резистор і конденсатор ввімкнені паралельно?
8. Яку величину ємності має конденсатор, якщо, будучи приєднаним через амперметр до мережі з напругою 220 В, 50 Гц, він споживає струм 6,9 А?
9. Яким чином можна розрахувати величину потужності втрат у діелектрику конденсатора?
10. Яким чином можна визначити тангенс кута діелектричних втрат у діелектрику?

ЛЕКЦІЯ 14 ЕЛЕКТРИЧНІ ЧАСТОТОМІРИ

• **Електричний частотомір** (*герцметр*) — це прилад для вимірювання частоти коливань електричної напруги. На електричних станціях і в . . енергосистемах він — один з найважливіших приладів контролю якості електричної енергії, бо саме величина частоти впливає майже на всіх споживачів електричної енергії, приєднаних до енергосистеми. В Україні та більшості європейських країн величина частоти, яка повинна бути в енергосистемі, становить 50 Гц і має підтримуватися близько цієї величини з відхиленням, що не перевищувало б $\pm 0,5$ Гц.

Зниження частоти в енергосистемі при незмінній величині напруги збільшує струми намагнічення в усіх двигунах і трансформаторах, приєднаних до енергосистеми, тобто зменшує коефіцієнт потужності у кожного з них, а також зменшує швидкість обертання всіх синхронних і асинхронних електродвигунів на всіх підприємствах, приєднаних до енергосистеми.

Залежно від принципу дії, частотоміри можуть бути: вібраційні; електродинамічні; феродинамічні; електромагнітні; камертонні; електронні (стрілочні та цифрові).

14.1. Вібраційні частотоміри

В енергетиці чи не найбільшого поширення набули *електромагнітні вібраційні частотоміри*. Їхня дія базується наявищі механічного резонансу коливань пружних пластин під дією збуджувальних коливань, створюваних силами тяжіння електромагніта, котушка котрого живиться від джерела змінного струму, частоту якого бажано виміряти.

Такі частотоміри можуть бути виконані з *безпосереднім* (рис. 14.1, *а*) чи *посереднім* (рис. 14.1, *б*) збудженням. У обох різновидах частотомірів елементами, чутливими до частоти, є пружні пластини 3 з загнутими кінцями 4, розташовані в ряд проти прорізів, зроблених у шкалі 5 (у частотоміра з безпосереднім збудженням може бути і два ряди таких пластин, як видно з рис. 14.1, *а*). У обох видозмінах таких частотомірів електромагніт 2 з обмоткою 1 створює змінне магнітне поле, яке у частотоміра з безпосереднім збудженням викликає притягання сталевих пластин 3 до полюса електромагніта, а у частотоміра з посереднім збудженням — притягання якоря 6, жорстко пов'язаного з основою 7, на якій закріплено кінці всіх пластин 3. Ці пластини можуть бути виконані як зі сталі, так і з якогось іншого пружного матеріалу (наприклад, бронзи). Якір 6 з основою 7 закріплено на двох пружинах 8 до цоколя приладу 9.

Таким чином, у частотомірів обох видозмін всі пружні пластини 3 вібрують з частотою, вдвоє більшою, ніж частота напруги живлення обмотки 1. А вдвоє більшою тому, що за один період напруги живлення і сталеві пластини 3, і якір 6 притягуються до полюсів електромагніта 2 й відпускаються від нього двічі, незалежно від полярності полюсів цього електромагніта. Але амплітуда вібрації кінців 4 цих пластин буде різною: найбільшою у тієї пластини, власна частота коД ливань якої дорівнює частоті сили збудження (тобто вдвод

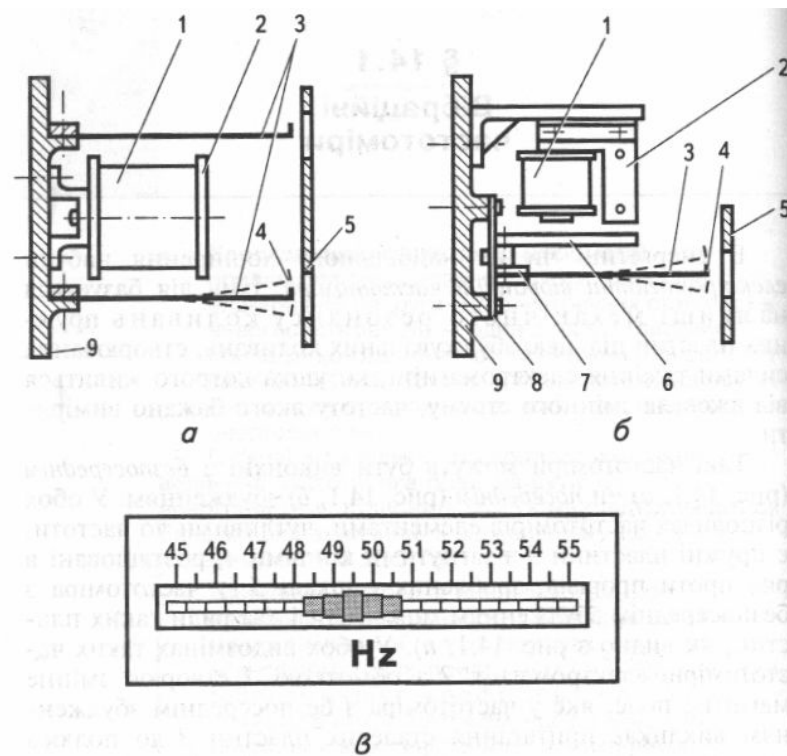


Рис. 14.1

Будова вібраційних частотомірів

більша за частоту напруги живлення). Менші амплітуди коливань будуть у сусідніх пластин, власна частота коливань яких трохи більша і трохи менша від подвоєної частоти напруги. І чим більш відмінною будуть власні частоти коливань пластин від цієї подвоєної частоти напруги, тим меншим буде розмах коливань кінців 4 цих пластин 3. Частоту коливань напруги знаходять за тією позначкою частотоміра, проти якої видимий розмах коливань кінця пластини 3 є найбільшим. На рис. 14.1, в, де зображено шкалу частотоміра, показано, як виглядає показання розглянутих частотомірів, коли частота напруги мережі становить 49,5 Гц.

14.2. Аналогові частотоміри

Аналогові частотоміри можуть бути: • електродинамічними; • феродинамічними; • електромагнітними; • випрямними; • електронними.

• **Електродинамічні частотоміри** — це прилади зі стрілко-вим показчиком, виконані на основі електродинамічного логометра. Вони вирізняються відносно високим класом точності, зручністю в користуванні, бо дають можливість робити відлік за положенням стрілки на шкалі, градуйованій безпосередньо у герцах.

Схему одного з переносних частотомірів, що виробляються в Україні, зображено на рис. 14.2. На схемі позначено: P_1 і P_2 — обмотки рухомих рамок приладу, жорстко закріплених на осі рухомої системи під прямим кутом одна до одної; HK_1 і HK_2 — обмотки нерухомих котушок; L — котушка індуктивності з феромагнітним осердям, що має невеликий повітряний проміжок; C_1 — конденсатор, який створює резонансний контур з котушкою L ; r_1 — додатковий опір, r_1 — підгінний опір; C_2 —

конденсатор, реактивний опір якого обмежує величину струму, що проходить через обмотку рамки P_2 ; АТ — автотрансформатор, що дає можливість при величинах номінальних напруг контрольованої частотоміром мережі 36, 100, 127 або 220 В подавати на вимірювальний механізм певну величину напруги, на якій проводилось градуювання приладу. Зауважимо, що відхилення величини напруги мережі у межах $\pm 10\%$ від її номінальної величини викликає лише невелику додаткову похибку у показаннях, яка не виходить за межі, допустимі для класу приладу. Частотоміри за наведеною схемою виробляють у декількох модифікаціях. Всі ці прилади здатні вимірювати частоти від 45 до 1650 Гц. Діапазон вимірювань частоти кожним з цих приладів відповідає $\pm 10\%$ від значення середньої частоти, вимірюваної даним приладом, тобто від 45...55 до 1350...1650 Гц.

Клас точності цих приладів — 0,2, тобто їхня основна похибка не перевищує $\pm 0,2\%$ від середньої частоти, вимірюваної приладом.

У цих приладах зі зміною величини частоти змінюються і також величина і фаза струму у нерухомих котушках HK_1 і HK_2 і у рухомій котушці-рамці P_1 . Так, якщо за частоти, що відповідає показанню посередині шкали приладу, величина реактивного індуктивного опору вітки, за якою проходить струм I_1 , дорівнюватиме величині ємнісного реактивного опору конденсатора C_1 , тоді через наявність резонансу напруг струм I_1 буде найбільшим і перебуватиме у фазі з напругою U_F .

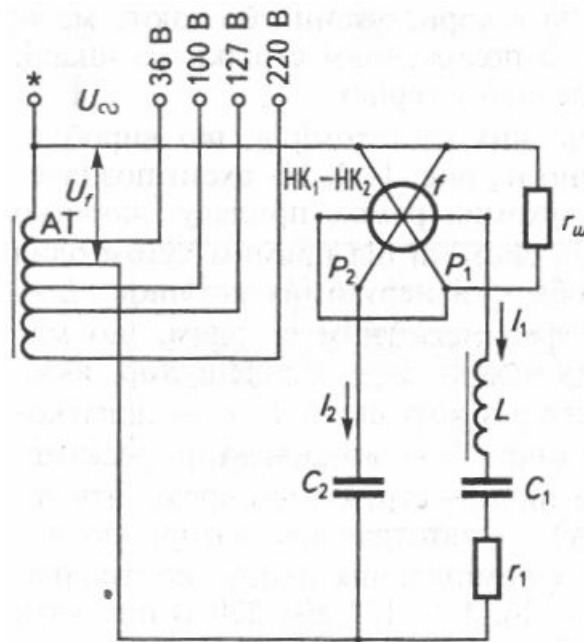


Рис. 14.2

Схема електродинамічного частотоміра

Рамка P_1 під дією обертового моменту, створеного взаємодією струму в рамці з магнітним потоком нерухомих котушок HK_1 і HK_2 , перебуватиме у положенні, де площини цієї рамки і нерухомих котушок збігатимуться. Дією рамки P_2 можна знехтувати, бо через неї проходить струм I_2 , зсунутий відносно напруги U_F майже на 90° . Якщо ж величина частоти напруги U_F буде відмінна від частоти резонансу f_R , то фаза струму I_1 відносно напруги U_F вже не збігатиметься з напругою, і кут зсуву по фазі струму

I_1 відносно струму I_2 буде відмінним від 90° . Тоді магнітний потік нерухомих котушок, взаємодіючи зі струмом I_2 , створить обертовий момент, що буде врівноважений моментом, створюваним рамкою P_1 при повороті рухомої частини приладу на кут, відповідний вимірюваній частоті напруги U_F . Зі схеми видно, що величина напруги U_F не впливає на кут відхилення рухомої частини, бо зміна величини напруги однаково вплине як на величину струму I_1 , так і на величину струму I_2 . Це призведе до однакової зміни величин обертових моментів, створюваних рамками P_1 і P_2 , котрі протидіють один одному, тобто не змінить рівноваги між ними за даного положення рухомої частини приладу.

У цьому приладі, як і у всякому логометрі, відсутні спіральні пружини, а струм підводиться до рамок за допомогою трьох тонких "безмоментних" струмопідводів.

Феродинамічні частотоміри, побудовані на основі феродинамічних логометрів, можуть бути виконані на основі електричних схем, аналогічних схемам електродинамічних частотомірів.

Різниця між ними лише в тому, що споживана потужність у феродинамічного приладу може бути суттєво меншою, ніж у електродинамічного. Часто феродинамічні частотоміри виконують на основі найпростіших однорамочних логометрів, у котрих як діючий, так і протидіючий моменти створюються однією рамкою, через яку водночас проходять два струми: один (що створює момент протидії) викликаний ЕРС взаємодії від дії струму, що є у обмотці нерухомої котушки, другий (той, що створює діючий момент) викликаний напругою мережі, частота якої вимірюється. Ця напруга прикладена до ємнісно-індуктивного кола приладу.

Як і у частотоміра електродинамічної системи, так і у феродинамічного для підводу струму до рамки використано "безмоментні" струмопідводи, але їх всього два.

Електромагнітний частотомір виконано на основі двоко-тушкового електромагнітного логометра, котрий має на своїй рухомій частині два феромагнітних осердя, кожне з яких взаємодіє з одною із нерухомих котушок. Обертові моменти електромагнітних систем, до яких входять згадані котушки і осердя, спрямовані зустрічне. Кожну з обмоток котушок ввімкнено послідовно з дроселем і конденсатором, які налаштовано в резонанс на відмінні величини частот. Одна — нижче за найменшу вимірювану частоту, друга — вища за найбільшу вимірювану частоту. Завдяки цьому рівність обертових моментів, що діють протилежно, в згаданих раніше системах буде одержано при різних величинах вимірюваної частоти у певних положеннях покажчика приладу на шкалі. Рухома частина цього приладу не має ні мо-ментних пружин, ні безмоментних струмопідводів.

Випрямні частотоміри, створені на основі магнітоелектричних логометрів, діють аналогічно тому, як діє електромагнітний частотомір. Тобто вони мають два резонансні контури: резонансна частота одного нижча за найменшу вимірювану, а іншого — вища за найбільшу вимірювану. Але змінні струми, що протікають у вказаних контурах, випрямлюються двопівперіодними випрямлячами і надсилаються до рамок рухомої частини магнітоелектричного логометра, кут повороту якої залежить від відношення цих струмів. Згідно з цим, положення стрілки на шкалі логоме- , тра визначатиме величину частоти напруги.

У *електронного частотоміра* приладом, що показує частоту, є магнітоелектричний міліамперметр, увімкнутий у коло вихідного каскаду електронного підсилювача. Вхідне коло підсилювача приєднане до частотне залежного ланцюга, струм якого мало залежить від величини напруги, частота котрої вимірюється. Завдяки наявності електронного підсилювача, потужність, споживана з вимірювального

кола, у електронного частотоміра значно менша, ніж у всіх розглянутих вище частотомірів.

14.3. Вимірювання частоти електричної напруги

На підприємствах енергетичного профілю частоту най-¹ частіше вимірюють за допомогою частотомірів, використання яких не викликає ніяких труднощів. Більшість частотомірів приєднують безпосередньо до мережі, частоту котрої необхідно виміряти, або до окремого джерела живлення змінного струму, частоту напруги якого слід контролювати. Необхідно лише впевнитись, що номінальна величина напруги мережі чи окремого джерела збігається з номінальною величиною напруги частотоміра, а також у тому, чи довіряти показанням частотоміра зразу ж після вмикання під напругу, чи лише після певного часу його роботи. Цей час може бути необхідний, щоб частини частотоміра, що містяться всередині його корпусу, нагрілися власним теплом, яке виникає в обмотках та осердях частотоміра, до належної температури.

Крім того, ще до встановлення і приєднання частотоміра необхідно впевнитись у відповідності умов у помешканні, де намічено встановити частотомір, тим умовам, які передбачені технічним описом приладу.

Більшість частотомірів, що застосовуються на електричних станціях та в енергосистемах, мають обмежену точність (клас їхньої точності 1,5; 1,0; 0,5; 0,2).

Разом з тим ці частотоміри потребують періодичної перевірки, перш за все відомчої, яку з дозволу Державних метрологічних органів проводять метрологічні підрозділи підприємств і організацій, де експлуатують прилади. Перевірка необхідна також після ремонту приладів.

При таких перевірках необхідно забезпечити клас точності зразкового засобу вимірювання у 4...5 разів вищий за клас приладу, що перевіряється. Якщо зразкових приладів необхідного класу точності немає, то використовують метод порівняння частот зразкового високоточного вимірювального генератора і джерела напруги змінної частоти, від якого живиться частотомір, що проходить перевірку. Використовують ще і метод вимірювання частоти за допомогою часто-томірного мосту.

Безпосереднє вмикання частотоміра на генератор зразкових частот часто буває неможливим через малу потужність таких генераторів.

Досить надійним методом порівняння двох частот є *метод биття*, реалізація якого можлива згідно зі схемою рис. 14.3.

На цьому рисунку позначено:

ЗГ — генератор зразкової частоти; ГЧ — генератор змінної частоти живлення приладу; ЧМ — частотомір, що перевіряється; П1, П2, ПЗ — підсилювачі; І — індикатор наявності коливань напруги; П — потенціометр.

Для чіткої роботи схеми необхідно, щоб підсилювачі П1 і П2 були однотипними, а величини напруг на їхніх виходах — однаковими (щоб досягти цього, у схемі є потенціометр П, за допомогою якого на вході до підсилювача П2 можна встановити яку завгодно величину напруги).

Індикаторний прилад І — це прилад для вимірювань постійного струму з нульовою позначкою посередині і шкали. Він має бути здатним витримувати величину напруги змінного струму, яка виникає на виході підсилювача ПЗ при появі на його вході складених напруг, створених підсилювачами П1 і П2.

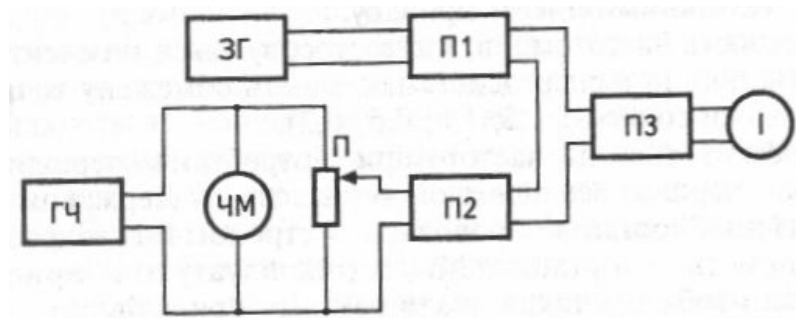


Рис. 14.3

Точне вимірювання частоти методом биття

Порядок повірки частотоміра на подібній вимірювальній схемі може бути таким. Генератором зразкової частоти ЗГ встановлюють значення однієї з частот, вимірюваних частотоміром ЧМ. Генератором ГЧ встановлюють приблизно таку саму частоту (за показаннями частотоміра ЧМ), після чого звертають увагу на показання індикатора І. Якщо величини обох частот мало відрізняються між собою, то між напругами, що є на виходах підсилювачів П1 і П2, виникає *биття* — тобто по чергово складання і віднімання миттєвих значень цих напруг.

Змінюючи величину частоти генератора ГЧ, досягають такого стану, при якому частота биття напруги стане зовсім малою (десь одне коливання за 5...10 с). У цьому разі можна вважати, що частоти напруг генераторів ЗГ і ГЧ зрівнюються.

Якщо в цей час показання покажчика частотоміра, що проходить повірку, відрізняється від частоти, генерованої генератором ЗГ, то, віднявши від показу частотоміра ЧМ (у герцах) дійсну частоту, з якою працює генератор ЗГ, можна визначити величину похибки частотоміра.

Метод биття можна застосовувати у виробничих лабораторіях при повірках частотомірів завдяки нескладності потрібного обладнання та достатньо високої точності вимірювань.

Застосовуючи зразковий кварцовий генератор з багатоступінчастим подільником частоти, можна отримати зразкову частоту з похибкою близько 0,000001 %.

Використовуючи термостатовані камертонні генератори, можна досягти точності, на порядок чи два меншої. Їх можна використовувати й без подільників частоти.

Іноді для визначення рівності вимірюваної і зразкової частот як нуль-індикатор використовують телефонну трубку. Це зовсім простий метод, який не вимагає додаткової апаратури, треба лише, щоб величини напруг зразкової і контрольованої частот були достатніми (і безпечними) для телефонної трубки. Але користуватись цим методом доцільно тільки при порівнянні підвищених і високих частот, бо людське вухо нездатне сприймати звуки з частотою, нижчою за 12...15 Гц. Наявність такої "мертвої" зони при порівнянні частот порядку 1000...5000 Гц і вище майже не впливає на точність вимірювань, але при порівнянні частот порядку 40...60 Гц вона зовсім недоречна, бо суттєво зменшує точність порівняння.

Контрольні запитання:

1. Яке значення має в енергосистемі і на що впливає відхилення частоти від її номінального значення?

2. Що таке частотомір?
3. Як визначається величина частоти за вібраційним частотоміром?
4. На які величини частот виконують вібраційні частотоміри?
5. З якою частотою і чому вібрують пластини звичайного вібраційного частотоміра, коли вимірювана частота становить 49,5 Гц?
6. Чому електродинамічні, феродинамічні, електромагнітні й випрямні частотоміри можуть давати показання при величинах частоти напруги, значно відмінних від тієї, що передбачена їхнім діапазоном вимірювання?
7. Чому стрілкові частотоміри виконують на основі логометричних вимірювальних механізмів?
8. Чому у стрілкових резонансних частотомірів величина похибки може дещо змінюватись у початковий період роботи після їх вмикання?
9. У чому полягає принцип вимірювання частоти методом биття?

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ З ДИСЦИПЛІНИ

1. Дорожовець М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик; За ред. Б. Стадника. - Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005.- Т. 2. Вимірювальна техніка. -656 с.
2. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Долгополов В.П., Грумінська Л.В. Метрологія та вимірювальна техніка. Навчальний посібник. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. - 252с.
3. Шаповаленко О. Г. Бондар В. М. Основи електричних вимірювань: Підручник.- К.:Либідь, 2002.- 320 с.
4. Аналоговые электроизмерительные приборы: Учеб. посо-А64 бие для вузов по спец. «Информ.-измер. техника»/Е. Г. Бишард, Е. А. Киселева, Г. П. Лебедев и др.,—2-е изд., перераб. и доп.— М.: Высш. шк., 1991—415 с: ил.
5. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; За ред. проф. Є.С. Поліщука. - Львів: Видавництво "Бескид Біт 2003. - 544 с.
6. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник. - Вінниця: ВДТУ, 2001. - 219с.
7. Евтихийев Н. Н. и др. измерение электрических и неэлектрических величин. Учебное пособие. -М.: Энергоатомиздат, 1990. -352с.
8. Атамальян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. -М.: Высшая школа, 1989. -375с.