

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА



Д. В. Тугай

ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ
З ДИСЦИПЛІНИ
**«ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ
ВИМІРЮВАНЬ»**

(для студентів усіх форм навчання
напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка")

Харків
ХНАМГ
2011

Тугай Д. В. Текст лекцій з дисципліни «Основи метрології та електричних вимірювань» (для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка») / Д. В. Тугай; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 106 с.

Автор: доц., к.т.н. Д. В. Тугай

Рецензент: проф., д.т.н. А. Г. Сосков

Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,
протокол № 7 від 17.02.2011 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ В МЕТРОЛОГІЇ.	
КЛАСИФІКАЦІЯ ПОХИБОК.....	7
1.1. Основні метрологічні визначення. Одиниці фізичних величин.	
Засоби вимірів та їх класифікація.....	7
1.2. Класифікація вимірювань.....	9
1.3. Похибки вимірювань.....	10
1.4. Похибки засобів вимірювань.....	13
1.5. Характеристики електровимірювальних приладів.....	15
РОЗДІЛ 2. КЛАСИФІКАЦІЯ МІР ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН.	
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СТРУМІВ І НАПРУГ.....	17
2.1. Міри фізичних величин.....	17
2.2. Вимірювальні перетворювачі струмів і напруг.....	18
2.2.1. Шунти.....	18
2.2.2. Додаткові резистори.....	20
2.2.3. Вимірювальні трансформатори.....	22
РОЗДІЛ 3. АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ.....	28
3.1. Загальні відомості про аналогові вимірювальні прилади.....	28
3.2. Технічні вимоги.....	29
3.3. Відлікові пристрої.....	30
3.4. Пристрої для створення протидіючого моменту.....	33
3.5. Пристрої для створення заспокійливого моменту.....	34
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПРИЛАДИ. ВИМІРЮВАЛЬНІ МЕХАНІЗМИ ПРИЛАДІВ І ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ.....	36
4.1. Прилади магнітоелектричної системи.....	36
4.2. Прилади електромагнітної системи.....	39
4.3. Електродинамічні прилади.....	42
4.4. Феродинамічні прилади.....	47
4.5. Прилади індукційної системи.....	48
4.6. Електростатичні прилади.....	49
РОЗДІЛ 5. ЕЛЕКТРОННІ АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ...	52
5.1. Електронні вольтметри.....	52
5.2. Електронно-променевий осцилограф.....	54
РОЗДІЛ 6. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ.....	57
6.1. Цифрові вольтметри постійного і змінного струму.....	58
6.2. Цифрові осцилографи.....	61
РОЗДІЛ 7. ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРЯМИМИ МЕТОДАМИ.....	63

7.1. Прямі методи вимірювань активних опорів.....	63
7.1.1. Мостом постійного струму.....	64
7.1.2. Омметром.....	68
7.1.3. Мегомметром.....	70
7.2. Вимірювання ємності та індуктивності прямими методами.....	72
7.2.1. Мостом змінного струму.....	72
7.2.2. Вимірювання ємності фарадметром.....	73
7.2.3. Вимірювання ємності балістичним гальванометром і вольтметром.....	74
РОЗДІЛ 8. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ В КОЛАХ ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО СТРУМУ.....	
8.1. Вимірювання потужності в колах постійного струму.....	76
8.2. Вимірювання потужності в колах змінного струму.....	78
8.2.1. Вимірювання активної потужності в однофазному колі змінного струму.....	78
8.2.2. Вимірювання реактивної потужності в однофазних колах змінного струму.....	80
8.2.3. Вимірювання активної потужності в трифазних трипровідних колах змінного струму.....	80
8.2.4. Вимірювання активної потужності в трифазних чотирипровідних колах змінного струму.....	82
8.2.5. Вимірювання реактивної потужності в трифазному колі змінного струму.....	83
РОЗДІЛ 9. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ Й ПОКАЗНИКІВ ЇЇ ЯКОСТІ.....	
9.1. Вимірювання активної електричної енергії.....	85
9.2. Вимірювання реактивної електричної енергії.....	90
9.3. Вимірювання коефіцієнта потужності й фазового зсуву.....	90
РОЗДІЛ 10. ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН.....	
10.1. Вимірювання магнітного потоку в постійному магнітному полі.....	95
10.1.1. За допомогою балістичного гальванометра (індукційно- імпульсний метод).....	95
10.1.2. Веберметром.....	97
10.2. Вимірювання магнітної індукції й напруженості магнітного поля....	97
10.2.1. Індукційно-імпульсний метод.....	97
10.2.2. За допомогою явища ядерного магнітного резонансу.....	98
10.2.3. З використанням ефекту Холу.....	100
СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....	101
ДОДАТКИ.....	102

ВСТУП

Розвиток науки і техніки завжди був пов'язаний з прогресом в області вимірювань. У фізиці, механіці і інших науках вимірювання дозволили точно встановити залежності, що виражають об'єктивні закони природи, тому ці науки називаються точними. Лорд Кельвін писав: «Кожна річ відома лише у тій ступені, в якій її можна виміряти».

Кожному новому відкриттю в області технічних і природничих наук передувала велика кількість різних вимірювань. Німецький фізик Г. Ом встановив основний закон електричного кола (закон Ома) в 1826 році шляхом низки точних експериментів, а в 1827 році дав йому теоретичне обґрунтування.

Перший в світі електровимірювальний прилад – «вказівник електричної сили» був створений у 1745 році академіком Г. В. Ріхманом, соратником М. В. Ломоносова. Це був електрометр – прилад для вимірювання різниці потенціалів, призначений для вимірювання атмосферної електрики. Однак тільки з другої половини 19 століття у зв'язку зі створенням і практичним застосуванням генераторів електричної енергії гостро постало питання про розробку різних електровимірювальних приладів, відсутність яких стримувала розвиток електротехніки.

Багато зробив для електровимірювальної техніки в другій половині 19 та на початку 20 століття видатний російський електротехнік М. О. Доліво-Добровольський. Ним були розроблені амперметр і вольтметр електромагнітної системи, виготовлений індукційний вимірювальний механізм з рухомою частиною у вигляді диска, що обертається, розроблені рекомендації щодо конструювання феродинамічних приладів.

Важливу роль у розвитку електровимірювальної техніки відіграли праці академіка Б. С. Якобі. Ним були розроблено ряд приладів для вимірювання опору електричного кола, зроблені перші кроки в області забезпечення єдності в вимірюваннях електричних величин. Річ в тому, що к 1880 року на практиці використовувалось 15 різних одиниць електричного опору, 8 одиниць ЕРС, 5 одиниць електричного струму. Таке положення сильно ускладнювало співставлення результатів розрахунків і вимірювань, що виконувались різними дослідниками. Гостро відчувалась необхідність введення єдиної системи електричних одиниць. Ця система була прийнята Першим конгресом з електрики, що відбувся у 1881 році.

Прогрес у розвитку засобів електровимірювальної техніки був забезпечений подальшим розвитком теорії вимірювань і розробкою на її основі

нових методів вимірювань, крім того широким використанням у конструкціях засобів вимірювань останніх досягнень мікроелектроніки, автоматики, обчислювальної техніки, а також успішним вирішенням ряду технологічних задач.

Новим кроком у розвитку електровимірювальної техніки стала розробка і освоєння серійного випуску цифрових вимірювальних приладів (ЦВП). Висока точність, швидкодія, перешкодостійкість, малий відбір потужності від об'єкта вимірювання, зручність візуального відліку, можливість подачі результату вимірювання у вигляді коду в зовнішні пристрої та ряд інших цінних ознак характерні для ЦВП поряд із повною автоматизацією процесу вимірювання. При розробці ЦВП поєднуються останні досягнення теорії електричних вимірювань із сучасною мікроелектронною елементною базою, автоматикою та обчислювальною технікою.

На сьогодні намітилася певна тенденція до застосування в електровимірювальних приладах мікропроцесорів. Останні дозволяють проводити обробку результатів вимірювання шляхом множення або ділення вимірюваної величини на постійний коефіцієнт, віднімання постійного коефіцієнта зі значення вимірюваної величини, контролю значення вимірюваної величини щодо заданих меж зони допуску, обчислення статистичних характеристик контрольованого процесу, лінеаризацію характеристик вимірювальних перетворювачів і т. д. Застосування мікропроцесорів також впливає на сам процес вимірювання та калібрування приладу.

Метою вивчення дисципліни «Основи метрології та електричних вимірів» є подання студентам основи знань, необхідних для вирішення виробничих завдань, пов'язаних з вибором засобів і методів вимірювань електричних, магнітних та неелектричних величин, а також для вивчення інших дисциплін спеціальності, в яких використовується електровимірювальні прилади.

Завдання дисципліни: навчити студентів знати принцип дії, властивості, характеристики розповсюджених засобів вимірювань електричних величин; вміти вибирати засоби і методи вимірювань, виконувати вимірювання і оцінювати їхні похибки.

Предметом вивчення в дисципліні є принципи роботи електромеханічних, цифрових та електронних вимірювальних приладів, їх застосування при проведенні електротехнічних вимірювань та обробка результатів вимірювань.

РОЗДІЛ 1. ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ В МЕТРОЛОГІЇ. КЛАСИФІКАЦІЯ ПОХИБОК

1.1. Основні метрологічні визначення. Одиниці фізичних величин. Засоби вимірів та їх класифікація

Наука про виміри, методи і засоби забезпечення їх єдності й досягнення необхідної точності називається *метрологією*.

Виміром називається знаходження значень фізичних величин дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

В Україні прийнята Міжнародна система одиниць (СІ). Основними одиницями СІ є: метр (м), кілограм (кг), секунда (с), ампер (А), кельвін (К), кандела (кд), моль (моль). Крім основних одиниць встановлені похідні одиниці. В табл.1.1 наведені найбільш вживані похідні одиниці електричних і магнітних величин.

Таблиця 1.1 – Похідні одиниці електричних і магнітних величин

Величина		Позначення		Вираження
		Укр.	Між.	
Робота, енергія, кількість теплоти	джоуль	Дж	J	Н·м
Потужність	ват	Вт	W	Дж/с
Кількість електрики	кулон	Кл	C	А·с
Електрична напруга, різниця потенціалів, ЕДС	вольт	В	V	Вт/А
Напруженість електричного поля	вольт на метр	В/м	V/m	–
Електричний опір	ом	Ом	Ω	В/А
Електрична ємність	фарада	Ф	F	Кл/В
Потік магнітної індукції	вебер	Вб	Wb	В·с
Індуктивність і взаємна індуктивність	генрі	Гн	H	Вб/А
Магнітна індукція	тесла	Тл	T	Вб/м ²
Напруженість магнітного поля	ампер на метр	А/м	A/m	–
Магніторушійна сила	ампер	А	A	–
Частота	герц	Гц	Hz	с ⁻¹

Найменування кратних і часткових одиниць утворюються шляхом застосування приставок: піко- (10^{-12}), нано- (10^{-9}), мікро- (10^{-6}), мілі- (10^{-3}), санти- (10^{-2}), деци- (10^{-1}), дека- (10^1), гекто- (10^2), кіло- (10^3), мега- (10^6), гіга- (10^9), тера- (10^{12}).

Засобами електричних вимірів називають технічні засоби, які використовують при електричних вимірах і які мають нормовані похибки. Розрізняють наступні види засобів електричних вимірів: міри, електровимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі, електровимірювальні установки, вимірювальні інформаційні системи.

Мірою називається засіб вимірів, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру. Наприклад, вимірювальна котушка опору, конденсатор, гиря. Набір мір являє собою спеціально підібраний комплект мір для відтворення ряду однойменних величин різного розміру. Прикладами набору мір є магазини опорів, ємностей і т.д.

Електровимірювальними приладами називають засоби електричних вимірювань, призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації, тобто інформації про значення вимірюваної величини, у формі, доступної для безпосереднього сприйняття спостерігачем, наприклад, амперметр, вольтметр, ватметр, фазометр.

Вимірювальні перетворювачі – технічні засоби з нормованими метрологічними характеристиками, що служать для перетворення вимірюваної величини в іншу величину або вимірювальний сигнал, зручний для обробки, зберігання, подальших перетворень, індикації й передачі, але безпосередньо не сприймається оператором. Вимірювальний перетворювач або входить до складу якого-небудь вимірювального приладу (вимірювальної установки, вимірювальної системи та ін.), або використовується разом з яким-небудь засобом вимірювань.

Електровимірювальна установка складається з низки засобів вимірювань (мір, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів) і допоміжних пристроїв, розташованих в одному місці. За допомогою таких установок можна в ряді випадків робити більш складні й більш точні вимірювання, ніж за допомогою окремих вимірювальних приладів. Електровимірювальні установки широко використовуються, наприклад, для перевірки й градування електровимірювальних приладів і випробувань магнітних матеріалів.

Вимірювальні інформаційні системи – це сукупність засобів вимірювань і допоміжних пристроїв, з'єднаних між собою каналами зв'язку. Вони призначені

для автоматичного одержання вимірювальної інформації від ряду її джерел, а також для її передачі й обробки.

1.2. Класифікація вимірювань

Залежно від способу одержання результату вимірювання поділяються на *прямі й непрямі*.

Прямими називаються вимірювання, результат яких одержується безпосередньо з дослідних даних. Приклади прямих вимірювань: вимірювання струму амперметром, температури термометром, маси на вагах.

Непрямими називаються вимірювання, при яких шукана величина безпосередньо не вимірюється, а її значення одержується на підставі відомої залежності між цією величиною й величинами, отриманими в результаті прямих вимірювань. Наприклад, потужність P у ланцюгах постійного струму обчислюють за формулою $P = U \cdot I$; напругу U в цьому випадку вимірюють вольтметром, а струм I – амперметром.

Залежно від сукупності прийомів використання принципів і засобів вимірювань всі методи діляться на *методи безпосередньої оцінки й методи порівняння*.

Під *методом безпосередньої оцінки* розуміють метод, за яким вимірювана величина визначається безпосередньо з відлікового пристрою вимірювального приладу прямої дії, тобто приладу, що здійснює перетворення вимірювального сигналу в одному напрямку (без застосування зворотнього зв'язку), наприклад, вимірювання струму амперметром, вимірювання тиску пружинним манометром. Метод безпосередньої оцінки простий, але вирізняється відносно низькою точністю.

Методом порівняння називають метод, за яким вимірювана величина порівнюється з величиною, відтвореною мірою. Відмінною рисою методу порівняння є особиста участь міри в процесі вимірювання, наприклад, вимір опору шляхом порівняння його з мірою опору – зразковою котушкою опору, вимір маси на важільних вагах із врівноваженням гирями. Методи порівняння забезпечують більшу точність вимірювань, ніж методи безпосередньої оцінки, але це досягається за рахунок ускладнення процесу вимірювання.

Методи порівняння підрозділяються на *нульові, диференціальні й заміщення*.

Нульовий метод – це метод порівняння вимірюваної величини з мірою, у якому дія вимірюваної величини на індикатор зводиться до нуля зустрічною

дією відомої величини. Прикладом може служити вимірювання електричного опору за допомогою врівноваженого мосту.

Диференціальний метод – це метод порівняння з мірою, за яким прилад виміряє різницю між вимірюваною величиною і відомою величиною, що відтворюється мірою. За диференціальним методом відбувається неповне врівноваження вимірюваної величини, і в цьому полягає відмінність диференціального методу від нульового. Прикладом цього методу може служити вимірювання електричного опору за допомогою неврівноваженого мосту. У цьому випадку вимірюваний опір буде визначатися не тільки відомими опорами плечей мосту, але й показанням індикатора.

Метод заміщення – це метод порівняння з мірою, за яким вимірювана величина A_x замінюється у вимірювальній установці відомою величиною A_0 , відтвореною мірою, причому шляхом зміни величини A_0 вимірювальна установка приводиться в попередній стан, тобто досягаються ті ж самі показники приладів, що й при дії величини A_x . У результаті A_x замінюється A_0 . Із всіх різновидів методів порівняння метод заміщення найбільш точний, тому що при заміні вимірюваної величини відомою ніяких змін у стані і дії вимірювальної установки не відбувається, внаслідок цього похибка у показниках вимірювальних приладів не впливає на результат вимірювання. Прикладом методу заміщення може служити вимір опору з почерговим включенням вимірюваного опору та регульованого зразкового опору в те ж саме плече мосту.

1.3. Похибки вимірювань

Результати вимірювання фізичної величини дають лише наближене її значення. Відхилення результату вимірювань від істинного значення вимірюваної величини називають похибкою вимірювання. Розрізняють абсолютну та відносну похибки вимірювань.

Абсолютна похибка вимірювання ΔA дорівнює різниці між результатом вимірювання A й істинним значенням вимірювальної величини A_0 :

$$\Delta A = A - A_0. \quad (1.1)$$

Відносна похибка вимірювання δ_A – це відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини, виражене у відсотках:

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100. \quad (1.2)$$

Оскільки істинне значення вимірюваної величини невідомо, замість нього використовують так зване *дійсне значення*, під яким розуміють значення вимірюваної величини, знайдене експериментальним шляхом і настільки наближене до істинного значення, що може бути використане замість нього. З цієї причини на практиці значення похибки вимірювання можна оцінити тільки приблизно. Похибки вважаються додатними, якщо результат вимірювання перевищує дійсне значення.

Для одержання дійсного значення вимірюваної величини в ряді випадків враховують похибки засобів вимірювання шляхом введення поправок. Поправкою називається абсолютна похибка, що береться зі зворотним знаком.

Приклад. Результат вимірювання струму $I=49,9$ А, а його дійсне значення $I_0=50,0$ А.

Абсолютна похибка вимірювання

$$\Delta I = I - I_0 = 49,9 - 50,0 = -0,1 \text{ А.}$$

Відносна похибка вимірювання $\delta_I = (\Delta I / I_0) \cdot 100 = (-0,1 / 50) \cdot 100 = -0,2\%$.

Поправка, яку слід ввести в результат вимірювання $-\Delta I = 0,1$ А.

Похибки вимірювань мають *систематичну* й *випадкову* складові, які називають також систематичною та випадковою похибками.

Під *систематичними похибками* розуміють похибки, що залишаються постійними або закономірно змінюються при повторних вимірюваннях тієї ж величини. Систематичні похибки можуть бути визначені й усунуті шляхом введення відповідних поправок. Прикладом систематичних похибок може служити похибка градування приладу, тобто помилки в розміщенні розподілів, нанесених на шкалу приладу. Вплив зовнішніх факторів (наприклад, коливання температури, напруги живлення) на засоби вимірювання також викликає появу систематичних похибок.

Випадковими називаються похибки, що змінюються випадковим чином при повторних вимірах тієї ж величини. Випадкові похибки не можна виключити дослідним шляхом. Вони походять від впливу на результат вимірювання причин випадкового характеру, наприклад, похибка від тертя в опорах вимірювальних приладів.

Зменшення впливу випадкових похибок на результат вимірювання досягається шляхом багаторазових вимірювань величини в однакових умовах. Якщо припустити, що систематичні похибки близькі до нуля, то найбільш достовірне значення, яке можна приписати вимірюваній величині на підставі

ряду вимірювань, є середнє арифметичне з отриманих значень, що визначається як

$$A_{cp} = (a_1 + a_2 + \dots + a_n) / n. \quad (1.3)$$

де a_1, a_2, \dots, a_n – результати окремих вимірювань; n – число вимірювань.

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

У практиці електричних вимірювань одним з найпоширеніших законів розподілу випадкових похибок є нормальний закон (Гауса).

Математичне вираження нормального закону має вигляд:

$$\rho(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2 / 2\sigma^2}. \quad (1.4)$$

де $\rho(\delta)$ – щільність ймовірності випадкової похибки δ ; σ – середнє квадратичне відхилення.

Середнє квадратичне відхилення може бути виражене через випадкові відхилення результатів спостереження ρ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_n^2}{n-1}}. \quad (1.5)$$

де $\rho_1 = a_1 - A_{cp}$; $\rho_2 = a_2 - A_{cp}$; $\rho_n = a_n - A_{cp}$.

Характер кривих, що описує рівняння (1.5) для двох значень σ , показаний на рис.1.1. Із цих кривих видно, що чим менше σ , тим частіше зустрічаються малі випадкові похибки, тобто тим точніше виконані вимірювання.

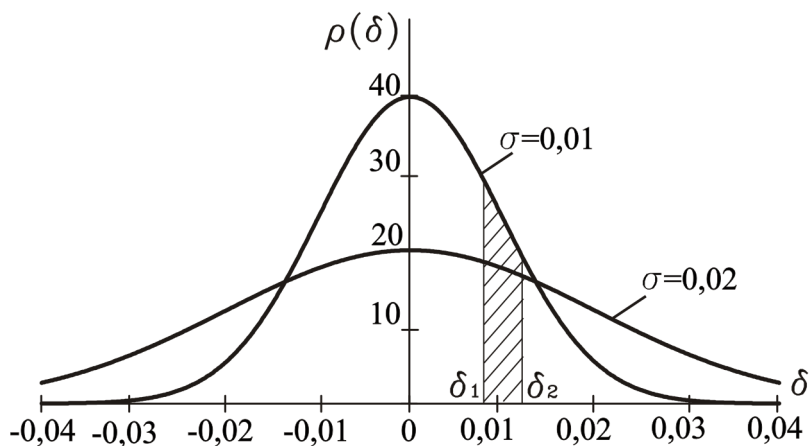


Рис.1.1 – Нормальний закон розподілу випадкових похибок

1.4. Похибки засобів вимірювань

Залежно від зміни в часі вимірюваної величини розрізняють наступні похибки засобів вимірювань:

Статичну похибку, яка виникає при вимірюванні сталої в часі величини;

Динамічну похибку – різницю між похибкою в динамічному режимі (тобто при зміні вимірюваної величини в часі) і статичною похибкою, що відповідає значенню вимірюваної величини в даний момент часу.

Залежно від умов виникнення похибок розрізняють:

Основну похибку – похибку засобів вимірювань, що використовуються у нормальних умовах, тобто при нормальному положенні, температурі навколишнього середовища $20 \pm 5^\circ \text{C}$, відсутності зовнішнього електричного і магнітного полів, крім земного, і т.п.;

Додаткову похибку – похибку засобів вимірювань, що виникає в результаті відхилення значення однієї з впливаючих величин від нормального значення. Іншими словами, це похибка, що виникає при відхиленні умов експлуатації від нормальних.

Розглянемо статичні похибки мір і електровимірювальних приладів.

Похибка міри. Кожна міра має номінальне значення, що майже завжди вказується спеціальним написом на самій мірі. При виготовленні міри практично неможливо забезпечити рівність номінального й істинного значень міри. Різниця між номінальним і істинним значеннями міри називається абсолютною похибкою міри.

Похибки електровимірювальних приладів

За способами вираження похибок вимірювальних приладів розрізняють *абсолютну, відносну і приведену* похибки.

Абсолютна похибка приладу Δ – це різниця між показником приладу x і дійсним значенням x_∂ вимірюваної величини, тобто

$$\Delta = x - x_\partial. \quad (1.6)$$

Відносна похибка приладу δ являє собою відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини. Відносна похибка звичайно виражається у відсотках і дорівнює:

$$\delta = \frac{x - x_\partial}{x_\partial} \cdot 100 = \frac{\Delta}{x_\partial} \cdot 100. \quad (1.7)$$

Приведена похибка γ є виражене у відсотках відношення абсолютної похибки Δ до значення величини, що нормується x_n

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_n} \cdot 100. \quad (1.8)$$

У реальних приладів залежність абсолютної похибки від вимірюваної величини x може бути представлена деякою смугою невизначеності, обумовленою випадковою похибкою та зміною характеристик приладів у результаті дії впливаючих величин і внаслідок старіння (рис.1.2). Тому значення абсолютної похибки, як правило, обмежене двома прямими 1, симетричними щодо осі абсцис, відстань між якими збільшується із зростанням вимірюваної величини (рис. 1.2).

Граничні значення абсолютних похибок Δ_{max} можуть бути як додатніми, так і від'ємними, але однаковими за модулем. Їх залежність від вимірюваної величини x характеризується прямими 1. Рівняння прямої 1, що не проходить через початок координат, може бути виражене за допомогою двох постійних коефіцієнтів a й b . Таким чином,

$$|\Delta_{max}| = |a| + |b \cdot x|, \quad (1.9)$$

де a називають граничним значенням адитивної похибки, $b \cdot x$ – граничним значенням мультиплікативної похибки.

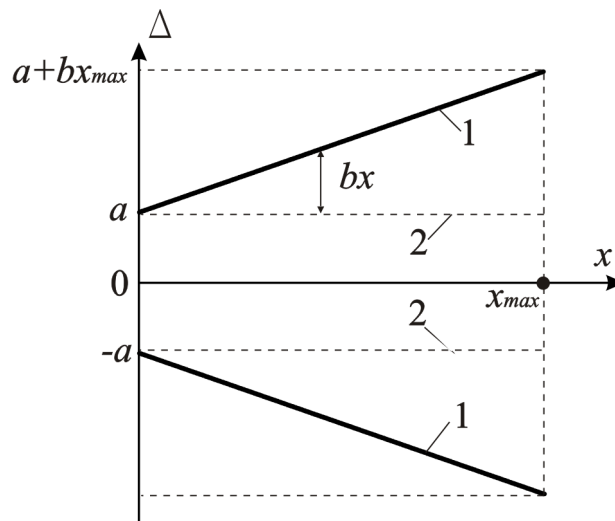


Рис. 1.2 – Залежність абсолютної похибки приладу від вимірюваної величини

Абсолютні адитивні похибки не залежать від вимірюваної величини x , а мультиплікативні – прямо пропорційні значенню x .

Джерела адитивної похибки – тертя в опорах, неточність відліку, шум, наводки й вібрації. Від цієї похибки залежить найменше значення величини, що

може бути вимірне приладом. Причини мультиплікативної похибки – вплив зовнішніх факторів і старіння елементів і вузлів приладів.

Клас точності – це узагальнена характеристика приладу, обумовлена межами допустимих основних і додаткових похибок. Межі допустимих змін показань від впливу зовнішніх факторів для будь-якого приладу встановлюються залежно від класу його точності відповідно до стандартів на окремі види приладів. Клас точності може виражатися одним числом або дробом.

У приладів, адитивна похибка яких різко переважає над мультиплікативною, всі значення похибок опиняються в межах прямих 2, паралельних осі ОХ (рис. 1.2). У результаті допустимі абсолютна й приведена похибки приладу виявляються постійними в будь-якій точці його шкали. У таких приладів клас точності виражається одним числом, обраним з ряду наступних чисел: $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, де $n=1; 0; -1; -2$ і т.д.

У приладів, клас точності яких виражається одним числом, основна приведена похибка у робочому діапазоні шкали, виражена у відсотках, не перевищує значення, що відповідає класу точності. До таких приладів відносяться більшість стрілкових і самописних приладів.

Клас точності приладів, у яких адитивна та мультиплікативна складові основної похибки співрозмірні, позначається у вигляді двох чисел, розділених косою рисою, наприклад, клас точності 0,1/0,05. Граничне значення основної відносної похибки приладів, виражене у відсотках, у цьому випадку може бути визначене шляхом розрахунку за формулою

$$|\delta_{\max}| = [c + d(|x_k / x|) - 1], \quad (1.10)$$

де x_k – кінцеве значення діапазону вимірювань; c і d – постійні числа, причому відношення c/d позначає клас точності приладу.

До приладів, клас точності яких виражається дробом, відносяться цифрові прилади, а також мости і компенсатори як з ручним, так і з автоматичним зрівноваженням.

1.5. Характеристики електровимірювальних приладів

Загальними характеристиками електровимірювальних приладів є їх *похибки, варіація показників, чутливість до вимірюваної величини, споживана потужність, час встановлення показників і надійність.*

Варіація показників приладу – це найбільша різниця показників приладу при тому самому значенні вимірюваної величини. Вона визначається при плавному підході стрілки до випробуваної позначки шкали при русі одного разу від початкової, а другого разу від кінцевої позначки шкали. Варіація показників характеризує ступінь стійкості показників приладу при тих самих умовах виміру тієї ж величини.

Вона приблизно дорівнює подвоєній похибці від тертя, тому що причиною варіації в основному є тертя в опорах рухливої частини.

Чутливістю електровимірювального приладу до вимірюваної величини x називається похідна від переміщення покажчика a по вимірюваній величині x :

$$S = \frac{da}{dx} = F(x). \quad (1.11)$$

Переміщення покажчика a , що виражається в поділках або міліметрах шкали, для великої групи приладів визначається, у першу чергу, кутом відхилення рухливої частини a вимірювального механізму. Крім того, воно залежить від типу відлікового пристрою і його характеристик (стрілковий або світловий покажчик, довжина шкали, число поділок шкали й ін.).

У приладів зі сталою чутливістю переміщення покажчика пропорційне вимірюваній величині, тобто шкала приладу рівномірна.

Чутливість приладу має розмірність, що залежить від характеру вимірюваної величини, тому, коли користуються терміном «чутливість», говорять «чутливість приладу до струму», «чутливість приладу до напруги» і т.д. Наприклад, чутливість вольтметра до напруги дорівнює 10 под/В.

Величина, зворотня чутливості, $C=1/S$ називається *ціною поділки* (постійною) приладу. Вона дорівнює числу одиниць вимірюваної величини, що припадають на одну поділку шкали. Наприклад, якщо $S=10$ под/В, то $C=0,1$ В/под.

При введенні електровимірювального приладу в коло, що перебуває під напругою, прилад споживає від цього кола деяку *потужність*. У більшості випадків ця потужність мала з точки зору економії електроенергії. Потужність, споживана приладами залежно від принципу дії, призначення приладу й межі виміру, має різні значення і для більшості приладів лежить у межах від 10^{-12} до 15 Вт.

Після введення електровимірювального приладу в електричне коло до моменту встановлення показників приладу, коли можна зробити відлік, проходить деякий проміжок часу (час заспокоєння). Під *часом встановлення*

показників електровимірювального приладу розуміється проміжок часу, що пройшов з моменту підключення або зміни вимірюваної величини до моменту, коли відхилення показника від сталого значення не перевищує 1,5% довжини шкали. Час встановлення показників для більшості типів приладів, що показують, не перевищує 4 с.

Цифрові прилади характеризуються *часом виміру*, під яким розуміють час із моменту зміни вимірюваної величини або початку циклу виміру до моменту одержання нового результату на відліковому пристрої з нормованою похибкою.

Під *надійністю* електровимірювальних приладів розуміють їх здатність зберегти задані характеристики за певних умов роботи протягом певного часу. Якщо значення однієї або декількох характеристик приладу виходить із заданих граничних значень, то говорять, що має місце відмова. Кількісною мірою надійності є мінімальна ймовірність безвідмовної роботи приладу в заданих проміжку часу й умовах роботи.

Ймовірністю безвідмовної роботи називається ймовірність того, що протягом певного часу T безперервної роботи не відбудеться жодної відмови. Час безвідмовної роботи зазначено в описах приладів. Часто користуються наближеним значенням цього показника, обумовленим відношенням числа приладів, що продовжують після певного часу T безвідмовно працювати, до загального числа випробуваних приладів.

Гарантійним терміном називають період часу, протягом якого завод-виготовлювач гарантує справну роботу виробу при дотриманні правил експлуатації приладу. Наприклад, для мікроамперметрів типу М266М підприємство-виготовлювач гарантує безоплатну заміну або ремонт приладу протягом 36 місяців від дня відвантаження з підприємства, а для частотомірів типу Е373 цей термін становить 11 років.

РОЗДІЛ 2. КЛАСИФІКАЦІЯ МІР ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СТРУМІВ І НАПРУГ

2.1. Міри фізичних величин

Залежно від ступеня точності й області застосування міри поділяються на *еталони, зразкові й робочі міри*. *Еталоном* називають засіб вимірювань, що забезпечує відтворення й зберігання одиниці фізичної величини для передачі її розміру іншим засобам вимірювань.

Залежно від точності відтворення одиниці й призначення еталони підрозділяються на *первинні*, що забезпечують відтворення одиниці з найвищою

досяжною в країні точністю, і *вторинні*, значення яких встановлюється за первинним еталоном. Вторинні еталони часто використовуються в якості робочих еталонів й призначаються для перевірки зразкових засобів виміру.

Зразкові міри призначені для перевірки й градування робочих мір і вимірювальних приладів. Вони можуть бути також безпосередньо використані для точних вимірів. Залежно від точності зразкові міри підрозділяються на три розряди. Зразкові міри першого розряду найбільш точні. Вони повіряються безпосередньо за робочими еталонами. Зразкові міри другого розряду повіряються за зразковими мірами першого розряду і т.д.

Робочі міри виготовлюються для широкого діапазону номінальних значень величин і використовуються для перевірки вимірювальних приладів і для вимірів на промислових підприємствах і в наукових організаціях.

2.2. Вимірювальні перетворювачі струмів і напруг

2.2.1. Шунти

Шунт є найпростішим вимірювальним перетворювачем струму в напругу. Він являє собою резистор, що має чотири затискачі. Два вхідних затискачі, до яких підводить струм I , називаються *струмовими* (затискачі A , B на рис. 2.1), а два вихідних затискачі, з яких знімається напруга U , називаються *потенційними* (затискачі B , Γ на рис. 2.1). До потенційних затискачів приєднують вимірювальний механізм (ВМ) приладу.

Шунт характеризується номінальним значенням вхідного струму $I_{ном}$ і номінальним значенням вихідної напруги $U_{ном}$. Їх відношення визначає номінальний опір шунта $R_{ш} = U_{ном} / I_{ном}$.

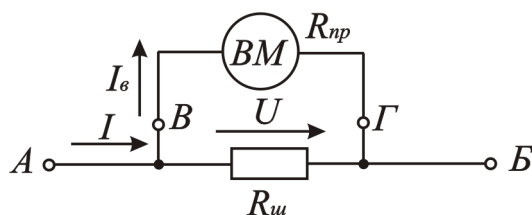


Рис. 2.1 – Схема з'єднання вимірювального механізму із шунтом

Шунти застосовуються для розширення меж вимірювань механізмів приладів за струмом, при цьому більшу частину вимірюваного струму пропускають через шунт, а меншу – через вимірювальний механізм. Шунти мають невеликий опір і застосовуються, головним чином, у колах постійного струму з магнітоелектричними вимірювальними механізмами.

На рис. 2.1 наведена схема включення магнітоелектричного механізму ВМ із шунтом. Струм I_s , що протікає через вимірювальний механізм, пов'язаний з вимірюваним струмом I залежністю

$$I_s = \frac{I \cdot R_{ш}}{R_{ш} + R_{пр}}, \quad (2.1)$$

де $R_{пр}$ – опір вимірювального механізму

Якщо необхідно, щоб струм I_s був в n разів меншим за струм I , то опір шунта повинен бути:

$$R_{ш} = \frac{R_{пр}}{p - 1}, \quad (2.2)$$

де $p = I/I_s$ – коефіцієнт шунтування.

Шунти виготовляють із манганіну. Якщо шунт розрахований на невеликий струм (до 30 А), то його, звичайно, вбудовують у корпус приладу (внутрішні шунти). Для виміру більших струмів використовують прилади із зовнішніми шунтами. У цьому випадку потужність, що розсіюється в шунті, не нагріває прилад.

На рис. 2.2 показаний зовнішній шунт на 2000 А. Він має масивні наконечники з міді, які служать для відводу тепла від манганінових пластин, що впаяні між ними. Затискачі шунта A і B — струмові, B і Γ – потенційні.

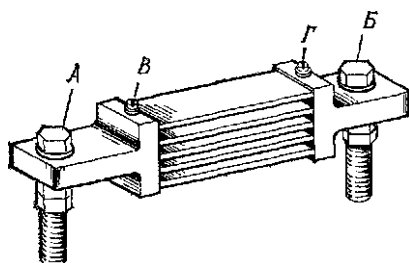


Рис. 2.2 – Зовнішній шунт.

Вимірювальний механізм приєднують до потенційних затискачів B і Γ , між якими й зосереджений опір шунта. При такому включенні вимірювального механізму усуваються похибки від контактних опорів.

Зовнішні шунти зазвичай виготовлюються каліброваними, тобто розраховуються на певні струми та падіння напруги. За ГОСТ 8042-78 калібровані шунти повинні мати номінальне падіння напруги 10, 15, 30, 50, 60, 75, 100, 150 і 300 мВ.

Для переносних магнітоелектричних приладів на струми до 30 А внутрішні шунти виготовляють на кілька границь виміру. На рис. 2.3 показані схеми багатограничних шунтів. Багатограничний шунт складається з декількох

резисторів, які можна переключати залежно від межі вимірювання важільним перемикачем (рис. 2.3,а) або шляхом переносу дроту з одного затискача на іншій (рис. 2.3,б).

Застосування шунтів з вимірювальними механізмами інших систем, крім магнітоелектричної, нераціональне, тому що інші вимірювальні механізми споживають більшу потужність, що призводить до істотного збільшення опору шунтів і, отже, до збільшення їхніх розмірів і споживаної потужності.

Під час роботи шунтів з вимірювальними механізмами на змінному струмі виникає додаткова похибка від зміни частоти, тому що опори шунта і вимірювального механізму по-різному залежать від частоти.

Шунти поділяються на класи точності 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 і 0,5. Число, що показує клас точності, позначає допустиме відхилення опору шунта у відсотках його номінального значення.

Серійні шунти випускаються для струмів не більше 5000 А. Для виміру струмів понад 5000 А допускається паралельне з'єднання шунтів.

2.2.2. Додаткові резистори

Додаткові резистори – це вимірювальні перетворювачі напруги в струм, а на значення струму безпосередньо реагують вимірювальні механізми стрілкових вольтметрів всіх систем, за винятком електростатичної та електронної. Додаткові резистори служать для розширення меж вимірювань за напругою вольтметрів різних систем та інших приладів, що мають паралельні кола, що підключаються до джерела напруги. Сюди відносяться, наприклад, ватметри, лічильники енергії, фазометри і т.д.

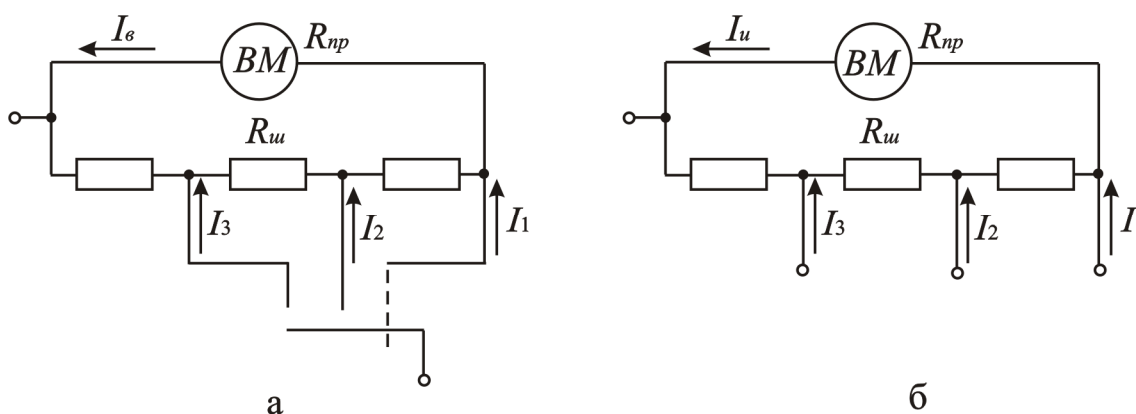


Рис. 2.3 – Схеми багатограничних шунтів

а – шунта з важільним перемикачем; б – шунта з окремими виводами

Додатковий резистор включають послідовно з вимірювальним механізмом (рис. 2.4). Струм I_e в колі, що складається з вимірювального механізму з опором R_{np} і додаткового резистора з опором R_d , складатиме:

$$I_{\epsilon} = \frac{U}{R_{np} + R_{\delta}}, \quad (2.3)$$

де U — вимірювана напруга.

Якщо вольтметр має межу виміру U_H , а опір вимірювального механізму R_{np} , і за допомогою додаткового резистора R_{δ} треба розширити межу виміру в p разів, то, з огляду на сталість струму I_{ϵ} , що протікає через вимірювальний механізм вольтметра, можна записати:

$$\frac{U_H}{R_{np}} = \frac{p \cdot U_H}{R_{np} + R_{\delta}}, \quad (2.4)$$

звідси

$$R_{\delta} = R_{np} \cdot (p - 1). \quad (2.5)$$

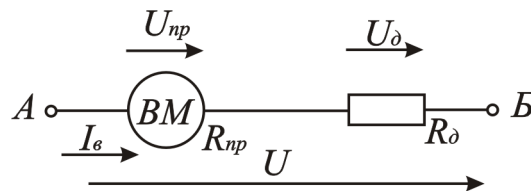


Рис. 2.4 – Схема включення вимірювального механізму з додатковим резистором

Додаткові резистори виготовляються зазвичай з ізольованого манганінового дроту, що намотується на пластини або каркаси з ізоляційного матеріалу. Вони застосовуються в колах постійного і змінного струму. Додаткові резистори, призначені для роботи на змінному струмі, мають біфілярну обмотку для одержання безреактивного опору.

При застосуванні додаткових резисторів не тільки розширюються межі вимірювань вольтметрів, але й зменшується їх температурна похибка. Якщо прийняти, що обмотка вимірювального механізму має температурний коефіцієнт опору β_{ϵ} , а додатковий резистор – температурний коефіцієнт опору β_{δ} , то температурний коефіцієнт усього вольтметра β (рис. 2.4) дорівнює:

$$\beta = \frac{\beta_{\epsilon} \cdot R_{np} + \beta_{\delta} \cdot R_{\delta}}{R_{np} + R_{\delta}}. \quad (2.6)$$

Звичайно, $\beta_{\delta}=0$, тоді

$$\beta = \beta_{\epsilon} \cdot \frac{R_{np}}{R_{np} + R_{\delta}}. \quad (2.7)$$

У переносних приладах додаткові резистори виготовляються секційними на кілька меж вимірювання (рис. 2.5).

Додаткові резистори бувають внутрішні та зовнішні. Останні виконуються у вигляді окремих блоків і поділяються на індивідуальні й калібровані. Індивідуальний резистор застосовується тільки з тим приладом, що з ним градувався. Калібрований резистор може застосовуватися з будь-яким приладом, номінальний струм якого дорівнює номінальному струму додаткового резистора.

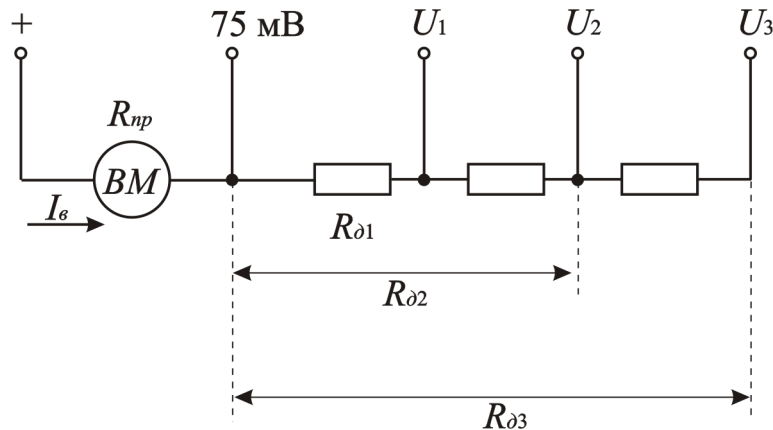


Рис. 2.5 – Схема багатограничного вольтметра

Калібровані додаткові резистори поділяються на класи точності 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 і 1,0. Вони виконуються на номінальні струми від 0,5 до 30 мА.

Додаткові резистори застосовуються для перетворення напруг до 30 кВ.

2.2.3. Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори поділяються на трансформатори струму та напруги й призначаються відповідно для перетворення великих змінних струмів і напруг у відносно малі струми і напруги. Завдяки трансформаторам можна застосовувати прилади з невеликими стандартними номінальними значеннями струму й напруги (наприклад, 5 А і 100 В) у високовольтних колах, якими можуть протікати великі струми.

Вимірювальні трансформатори складаються із двох ізольованих одна від одної обмоток, розміщених на магнітопроводі: первинної із числом витків W_1 і вторинної із числом витків W_2 (рис. 2.6).

При вимірах у високовольтних колах трансформатори забезпечують безпеку обслуговування приладів, приєднаних до вторинних обмоток. Це досягається за рахунок електричної ізоляції (гальванічного розділення) первинної й вторинної обмоток трансформаторів і заземлення металевого корпусу та вторинної обмотки. При відсутності заземлення й ушкодженні

ізоляції між обмотками вторинна обмотка і підключені до неї прилади опиняться під високим потенціалом, що неприпустимо.

В трансформаторах струму, як правило, первинний струм I_1 більше вторинного I_2 . Первинна обмотка виконується із дроту різного січення залежно від номінального первинного струму I_{1H} . Якщо I_{1H} перевищує 500 А, вона може складатися з одного витка у вигляді прямої мідної шини (або стрижня), що проходить крізь вікно сердечника. Вторинна обмотка у всіх стандартних трансформаторів струму намотується із проводів невеликого січення. Відповідно до ГОСТ 7746-78Е вторинний номінальний струм I_{2H} може бути 1; 2; 2,5; 5А при значеннях I_{1H} у межах від 0,8 до 40 000 А.

В трансформаторах напруги первинна напруга U_1 більша вторинної U_2 , тому в них $W_1 > W_2$. Обидві обмотки виконуються з відносно тонкого дроту (первинна – з більш тонкого, ніж вторинна). Вторинна номінальна напруга U_{2H} , в стаціонарних трансформаторах становить 100 і $100/\sqrt{3}$ В при первинній номінальній напрузі U_{1H} до 1150 кВ.

За схемою включення у вимірювальне коло й умовою роботи трансформатори струму й напруги відрізняються один від одного. Первинна обмотка трансформаторів струму, виводи якої позначаються буквами L_1 і L_2 (лінія), вмикається у вимірювальне коло послідовно (рис. 2.6). До вторинної обмотки, виводи якої позначаються буквами B_1 , B_2 (вимірювання), послідовно підключають амперметри, послідовні обмотки ватметрів, лічильників та інших приладів. Первинна обмотка трансформатора напруги, виводи якої позначаються буквами A , X (початок – кінець), включається у вимірювальне коло паралельно, а до виводів вторинної обмотки, позначеної відповідно буквами a , x , підключають паралельно вольтметри, паралельні кола ватметрів, лічильників та інших приладів.

За показами приладів, включених у вторинні обмотки, можна знайти значення вимірюваних величин. Для цього їх покази треба помножити на дійсні коефіцієнти трансформації K_I і K_U . Для трансформатора струму $K_I = I_1/I_2$. Для трансформатора напруги $K_U = U_1/U_2$.

Дійсні коефіцієнти трансформації зазвичай невідомі, тому що вони залежать від режиму роботи трансформатора, тобто від значень струмів і напруг, характеру і значення опору навантаження вторинного кола та частоти струму; тому показники приладу множать не на дійсні, а на номінальні коефіцієнти трансформації. Вони зазначені на щитку трансформатора у вигляді дроби, чисельник якого є номінальним значенням первинної, а знаменник – вторинної величини. Номінальний коефіцієнт трансформації для даного трансформатора

має постійне значення. Для трансформаторів струму позначимо його K_{IH} , для трансформаторів напруги – K_{UH} .

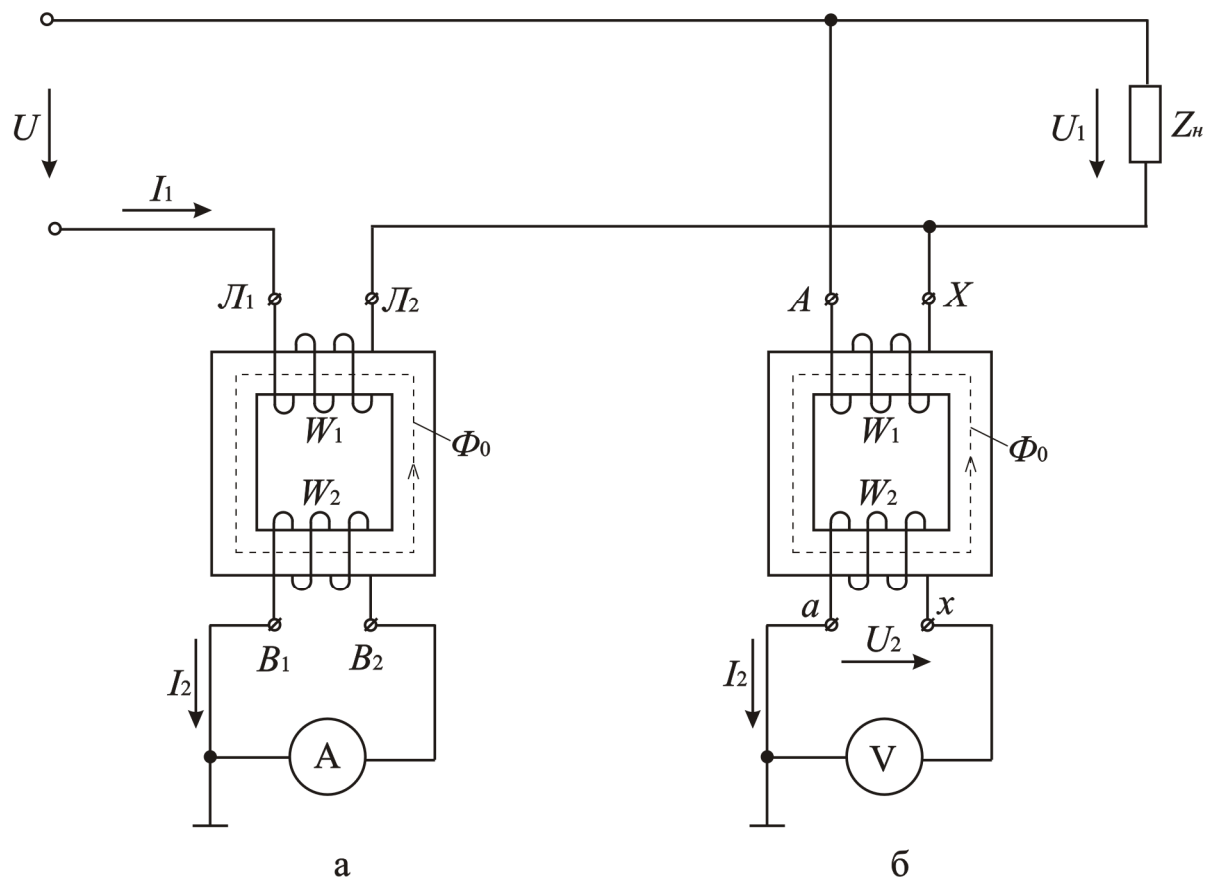


Рис. 2.6 – Схеми включення вимірювальних трансформаторів
а – трансформатора струму; б – трансформатора напруги

Відносна похибка через нерівність дійсного й номінального коефіцієнтів трансформації визначається за співвідношенням:

для трансформатора струму

$$\delta_I = \frac{I_1' - I_1}{I_1} \cdot 100 = \frac{K_{IH} - K_I}{K_I} \cdot 100, \quad (2.8)$$

де $I_1' = K_{IH} \cdot I_2$, $I_1 = K_I \cdot I_2$;

для трансформатора напруги

$$\delta_U = \frac{U_1' - U_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{K_{UH} - K_U}{K_U} \cdot 100, \quad (2.9)$$

де $U_1' = K_{UH} \cdot U_2$, $U_1 = K_U \cdot U_2$.

Похибка δ_I називається струмовою похибкою, а δ_U – похибкою напруги. Крім цих похибок, у вимірювальних трансформаторів є ще так звана кутова

похибка. Вона виникає внаслідок фазових зсувів між первинною й вторинною величиною, що їх вносить трансформатор.

В ідеальному трансформаторі струму вектор вторинного струму I_2 зсунутий за фазою щодо вектора первинного струму I_1 на 180° . Такий самий зсув за фазою повинен бути між векторами вторинної U_2 і первинної U_1 напруг у трансформаторі напруги. У реальному трансформаторі кут між оберненим на 180° вектором вторинної величини та відповідним вектором первинної величини не дорівнює нулю, а становить кут δ , що називається кутовою похибкою трансформатора. Похибка вважається додатною, якщо обернений на 180° вектор вторинної величини випереджає вектор первинної величини.

Кутова похибка вимірювальних трансформаторів впливає тільки на показники приладів, відхилення рухомої частини яких залежить від зсуву фаз між струмами в колах цих приладів. До них належать ватметри, лічильники енергії та фазометри.

Трансформатор струму працює в режимі, близькому до короткого замикання, тому що в його вторинну обмотку включаються прилади з малим опором. Повний сумарний опір $Z=R+jX$ приладів і дротів, що підводять струм, є навантаженням трансформатора струму. Магнітопроводи трансформаторів струму виготовляють з тонкої листової високосортної трансформаторної сталі, а для особливо точних трансформаторів – на залізонікелях типу пермалоя. Для зменшення втрат на вихрові струми листи ізолюються один від одного. Найчастіше застосовуються магнітопроводи стрижневого та круглого (кільцевого) типів.

Для зменшення (компенсації) похибок у трансформаторах струму використовують штучне підмагнічування магнітопроводу додатковими полями до значення, при якому матеріал магнітопроводу має найбільшу магнітну проникність. Це призводить до відносного зменшення намагнічуючого струму I_0 .

Практично компенсація підмагнічуванням здійснюється вторинним струмом при проходженні його по додаткових обмотках або підмагнічуванням за рахунок потоків розсіювання. Такі трансформатори називаються *компенсованими*.

В установках з великими струмами короткого замикання при недостатньо надійній конструкції трансформатора можливі його механічні й термічні ушкодження. Механічні ушкодження відбуваються внаслідок електродинамічної взаємодії провідників зі струмами.

Електродинамічною стійкістю трансформатора струму називають відношення амплітуди струму, що він може витримати без зміни своїх механічних і електричних властивостей протягом одного напівперіоду, до амплітуди номінального струму трансформатора.

Термічною стійкістю трансформатора струму називається відношення діючого (середньоквадратичного) значення струму, що трансформатор може витримувати протягом 1 секунди без зміни своїх властивостей, до діючого значення номінального первинного струму трансформатора.

В установках з великими струмами короткого замикання застосовуються трансформатори струму з високою термічною й електродинамічною стійкістю.

Залежно від області застосування вимірювальні трансформатори виготовляються стаціонарними, призначеними для установки на відкритих майданчиках розподільчих пристроїв, станцій і підстанцій та в закритих приміщеннях, і переносними – для використання в лабораторіях. Стаціонарні трансформатори, як правило, мають одну границю вимірювання, а переносні – кілька границь. Наприклад, переносний трансформатор струму типу I-54 класу точності 0,2 має номінальні первинні струми 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 20,0 і 50,0 А, вторинний струм 5А та номінальне навантаження 0,4 Ом.

За точністю трансформатори струму поділяються на десять класів: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 5 і 10.

Вимірювальні трансформатори напруги працюють у режимі, близькому до холостого ходу, тому що до вторинної обмотки трансформатора підключають прилади з відносно великим внутрішнім опором.

Магнітопроводи трансформаторів зазвичай виготовляють із кращих сортів кременистої сталі. Завдяки цьому зменшуються реактивні опори X_1 і X_2 , обумовлені відповідно потоками розсіювання первинної й вторинної обмоток трансформаторів, і, крім того, зменшуються струм холостого ходу і втрати в магнітопроводі.

Відповідно до ГОСТ 1983-77Е та ГОСТ 23625-79 стаціонарні трансформатори напруги поділяються на класи точності 0,2; 0,5; 1 і 3, а лабораторні – на класи 0,05; 0,1 і 0,2. Стаціонарні трансформатори напруги виготовляються на номінальні первинні напруги до сотень кіловольтів при вторинній напрузі 150, 100 і $100/\sqrt{3}$ В. Номінальні потужності становлять від 5 до 1200 ВА.

За зовнішнім виглядом і конструкцією трансформатори напруги мало відрізняються від силових трансформаторів на невеликі потужності.

Лабораторні трансформатори найчастіше бувають переносними на кілька границь вимірювань.

Для трифазних кіл виготовляються трифазні трансформатори напруги. На трьох стрижнях магнітопроводу розташовуються три первинні і три вторинні обмотки. Первинні обмотки під'єднуються до трифазного кола, до виводів вторинних обмоток під'єднуються вимірювальні прилади.

За типом охолодження трансформатори напруги діляться на сухі (для напруг до 3 кВ) і трансформатори із заливкою маслом або ізолюючою масою (для напруг 3 кВ і вище).

Вимірювальні трансформатори постійного струму застосовуються для вимірювань дуже великих струмів, зазвичай понад 6 кА. Такі струми зустрічаються, наприклад, в алюмінієвій промисловості, і шунти для них виходять досить громіздкими і дорогими. Достоїнством трансформаторів постійного струму є безпека їх застосування в колах з високою напругою через те, що вторинні обмотки ізолювані від первинних.

Принцип дії вимірювальних трансформаторів постійного струму істотно відрізняється від звичайних вимірювальних трансформаторів.

На рис. 2.7 зображена принципова схема такого трансформатора. Він складається із двох повністю однакових кільцевих магнітопроводів *I* і *II*, виготовлених із матеріалу з високою магнітною проникністю (наприклад, з пермалоя). Первинні обмотки W_1 намотують на обидва магнітопроводи в одному напрямку, з'єднують послідовно й підключають до джерела вимірюваного постійного струму I_x . Зазвичай первинними обмотками служить струмонесуча шина, протягнута в отвори магнітопроводів; у цьому випадку $W_1=1$. Вторинні обмотки W_2 , намотані на магнітопроводах у протилежних напрямках, з'єднують послідовно та через амперметр змінного струму підключають до допоміжного джерела змінної напруги.

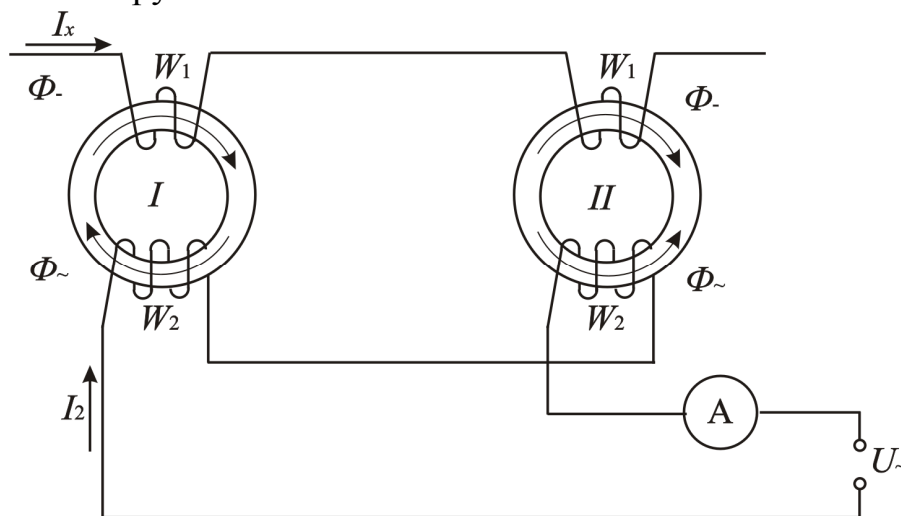


Рис. 2.7 – Принципова схема вимірювального трансформатора постійного струму

Вимірюваний струм I_x , протікаючи по первинній обмотці, створює в обох магнітопроводах однаково спрямовані та рівні магнітні потоки Φ_+ . Нехай у цей момент часу змінний струм I_2 , що протікає по обмотках W_2 , має такий напрямок, що потік Φ_- у магнітопроводі I , створений МДС $I_2 W_2$, збігається за напрямом з потоком Φ_+ , тоді в магнітопроводі II ці потоки будуть спрямовані в протилежні сторони, тому що обмотки W_2 включені зустрічно.

Відзначимо, що якщо форма кривої намагнічування близька до ідеальної прямокутної, активний опір кола змінного струму малий, а змінна напруга досить велика, то форма кривої струму I_2 дуже близька до прямокутної і максимальне його значення майже не залежить від напруги й частоти джерела живлення. При прямокутній формі кривої струму I_2 його середнє значення дорівнює максимуму. Середнє значення струму вимірюють амперметром випрямної системи.

Вітчизняною промисловістю випускаються трансформатори постійного струму типу I-58М на номінальні первинні струми від 15 до 70 кА. Вони мають клас точності 0,5.

РОЗДІЛ 3. АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

3.1. Загальні відомості про аналогові вимірювальні прилади

Аналоговими вимірювальними приладами називають прилади, показання яких є неперервною функцією змін вимірюваної величини. Аналоговий електровимірювальний прилад – це, в першу чергу, показуючий прилад, тобто прилад, що допускає відлік показників. Для цього у всіх аналогових електровимірювальних приладів є *відліковий пристрій*, що складається зі *шкали*, розташованої на циферблаті приладу, і *показчика*.

Показчик відлікового пристрою жорстко зв'язаний з рухомою частиною вимірювального механізму, що здійснює перетворення вимірюваної електричної величини в кутове переміщення рухомої частини, а отже, і показчика.

У вимірювальному механізмі поворот рухомої частини здійснюється під дією виникаючого в механізмі обертаючого моменту. Значення обертаючого моменту пропорційне вимірюваній електричній величині. Для того щоб забезпечити однозначний зв'язок між кутом повороту рухомої частини і значенням вимірюваної величини, необхідно в кожному аналоговому приладі створювати *протидіючий момент*, пропорційний куту повороту рухомої частини механізму.

Характер руху рухомої частини, а отже, і покажчика до сталого положення відіграє в приладах істотну роль, що визначає швидкодію приладу. Тому у всіх аналогових приладах передбачені різні пристрої для створення оптимального заспокійливого моменту.

Наявність рухомої частини у вимірювальному механізмі вимагає застосування спеціальних опорних пристроїв, що створюють відносно малий момент тертя.

Таким чином, незалежно від призначення аналогового електровимірювального приладу й від різновиду застосовуваного в ньому вимірювального механізму, будь-який прилад містить загальні для всіх аналогових приладів вузли й елементи: *відліковий пристрій, пристрої, що створюють протидіючий й заспокійливий моменти, опорний пристрій*. Крім того, спільними для всіх аналогових приладів є технічні вимоги, обумовлені відповідними державними стандартами. Нижче розглядаються технічні вимоги до аналогових приладів, а також конструкції та особливості роботи всіх названих вище пристроїв.

3.2. Технічні вимоги

Загальні технічні вимоги до всіх аналогових і цифрових приладів, а також до мір електричних величин і вимірювальних перетворювачів сформульовані в ДСТ 30012.1-2002 «Прилади аналогові електровимірювальні показуючі прямої дії і допоміжні частини до них». На підставі ДСТ 30012.1-2002 розроблені й введені в дію часткові державні стандарти на окремі види електровимірювальної апаратури, наприклад ДСТ 8711-93(2002) «Особливі вимоги до амперметрів і вольтметрів», ДСТ 8476-93(2002) «Особливі вимоги до ватметрів і варметрів», ДСТ 8039-93(2002) «Особливі вимоги до фазометрів» і т.д. Державні стандарти на окремі види апаратури встановлюють різні класи точності приладів. Так, ДСТ 8711-93(2002) для амперметрів і вольтметрів встановлює наступні класи точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 і 5,0. Крім того, дозволяється випуск амперметрів і вольтметрів класу точності 0,3.

Класи точності приладів встановлюються за основною приведеною похибкою. Найбільше чисельне значення основної приведеної похибки приладу кожного даного класу не повинне перевищувати чисельного значення цього класу. Наприклад, для приладу класу 0,2 чисельне значення найбільшої основної приведеної похибки не повинне перевищувати $\pm 0,2\%$.

Крім того, у державних стандартах для кожного даного класу точності приладу регламентуються *похибки від варіації показників* і зміни показників

приладу від різних зовнішніх факторів (нахил приладу, температура навколишнього середовища, зовнішні магнітні й електричні поля й т.д.).

Вимоги до електричної міцності й опору ізоляції між ізольованими від корпусу за постійним струмом електричними колами приладів встановлюються відповідними державними стандартами. Крім того, регламентується час заспокоєння рухомої частини приладів.

Час встановлення показників, обумовлений часом заспокоєння рухомої частини, в абсолютній більшості аналогових приладів не повинен перевищувати 4 с. Це означає, що з моменту подачі вимірюваної величини на вхід приладу або з моменту зміни цієї величини, положення покажчика відлікового пристрою встановлюється не більш ніж через 4 с. Винятком є термоелектричні й електростатичні прилади, для яких найбільший час встановлення показників не перевищує 6 с.

Відповідно до вимог державних стандартів, аналогові показуючі прилади повинні витримувати навантаження напругою або струмом, рівним 120% кінцевого значення, протягом 2 годин. Регламентуються також короточасні (ударні) перевантаження приладів струмом і напругою. Так, для амперметрів класів точності 0,5–5,0 передбачена можливість перевантаження струмом, рівним $10 \cdot I_H$, протягом 0,5 с.

Для всіх приладів за значеннями впливаючих кліматичних і механічних величин ДСТ 30012.1-2002 встановлює сім різних груп. Регламентуються значення кліматичних і механічних величин для кожної групи приладів, як при робочих умовах застосування, так і при транспортуванні й зберіганні приладів (граничні умови). Так, четверта група засобів вимірювання має наступні кліматичні робочі умови застосування: нижнє значення температури навколишнього повітря -10°C , верхнє $+40^\circ \text{C}$, найбільша відносна вологість повітря 90% при температурі $+30^\circ \text{C}$ й атмосферному тиску 86–106 кПа.

Принцип дії приладу, можливість його роботи в тих або інших умовах, можливі граничні похибки приладу встановлюються за умовними позначеннями, нанесеними на циферблаті приладу. Види умовних позначень для маркування приладів, встановлені ДСТ 30012.1-2002, наведені в додатку А.

3.3. Відлікові пристрої

Вище відзначалося, що відліковий пристрій засобу виміру обов'язково має шкалу, нанесену на циферблат приладу. Технічні вимоги до циферблатів і шкал приладів встановлені ДСТ 5365-83.

На шкалу (рис. 3.1) наносяться позначки, зазвичай у вигляді короткої вертикальної риски, що відповідають деяким значенням вимірюваної величини. Інтервал між двома сусідніми позначками шкали називають *розподілом шкали*. Позначки шкали, у яких проставлені числа (на шкалі на рис. 3.1 це числа 0; 2; 4; 6; 8 і 10), називають *числовими позначками шкали*. Шкали можуть бути *рівномірними* (розподіл постійної довжини) і *нерівномірними* (розподіл непостійної довжини). На рис. 3.1 зображена нерівномірна шкала. Найменше значення вимірюваної величини, зазначене на шкалі, називається *початковим значенням шкали x_n* . У нашому випадку (рис. 3.1) $x_n=0$. Найбільше значення вимірюваної величини, зазначене на шкалі, називають *кінцевим значенням шкали x_k* . Для шкали, зображеної на рис.3.1, $x_k =10$. За шкалою приладу можна визначити *діапазон показників приладу* і *діапазон вимірювань приладу*. *Діапазоном показників* називають область значень шкали, обмежену кінцевим і початковим значеннями шкали. У розглянутому випадку діапазон показників дорівнює 0-10.

Область значень вимірюваної величини, для якої нормовані допустимі похибки засобу вимірювань, називають *діапазоном вимірювань*. Зазвичай при рівномірній шкалі діапазон вимірювань і діапазон показників збігаються. Однак, при нерівномірній шкалі діапазон показників не збігається з діапазоном вимірювань. Для визначення діапазону вимірювань на шкалах таких приладів, звичайно, ставлять крапку на початку й кінці діапазону вимірювань, якщо найбільше значення вимірюваної величини діапазону вимірювань не збігається з кінцевим значенням шкали. На шкалі, зображеній на рис. 3.1, діапазон вимірювань дорівнює 2-10.

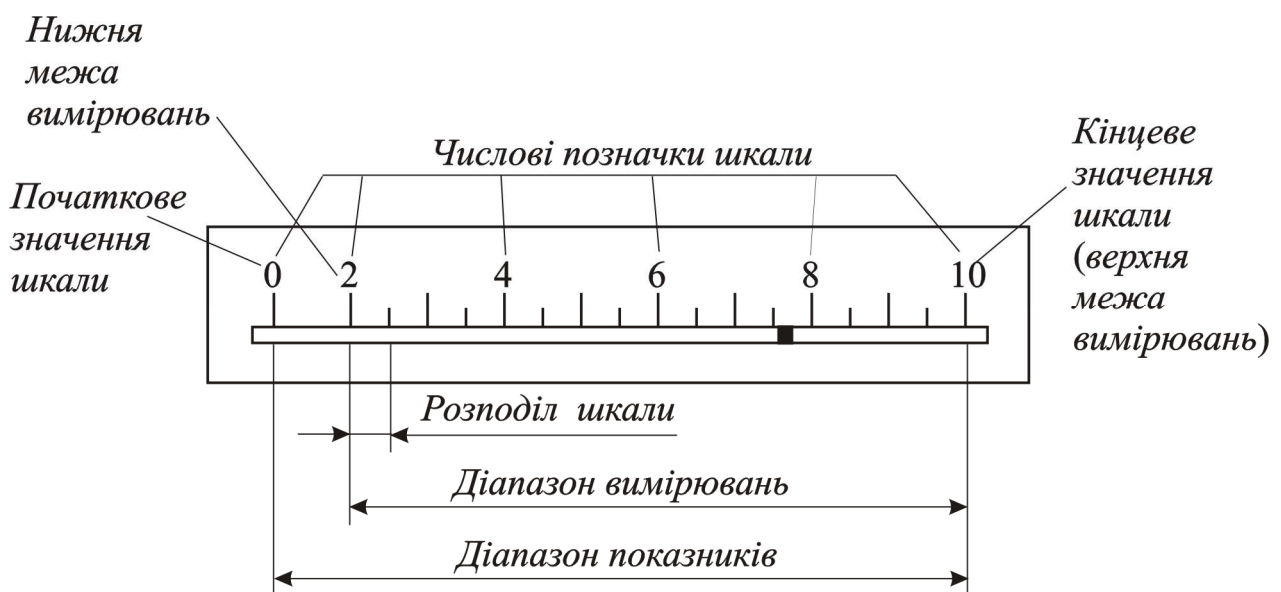


Рис. 3.1 – Шкала приладу з оптичним відліковим пристроєм

Найменше значення діапазону вимірювань (у нашому випадку числова позначка 2) називають *нижньою межею вимірювань*, а найбільше значення діапазону вимірювань – *верхньою межею вимірювань*. На розглянутій шкалі верхня межа вимірювань збігається з кінцевим значенням шкали й дорівнює 10.

Відлік значення вимірюваної величини за шкалою приладу здійснюється за допомогою покажчика. Розрізняють два види покажчиків: покажчик у вигляді стрілки, кінець якої виконаний у формі, що забезпечує відлік показників із необхідною точністю, і світловий покажчик у вигляді променя світла, що утворює на шкалі світлову пляму з індексом, за яким роблять відлік показників. Вимоги до форми й розмірів частини, що показує, стрілок і індексів світлових покажчиків встановлені ДСТ 3051-69.

У приладах зі світловим покажчиком на рухомій частині вимірювального механізму встановлюється невелике дзеркальце. Промінь світла, створений звичайною мініатюрною лампочкою розжарювання за допомогою найпростішої оптики, відбиваючись від дзеркальця рухомої частини, попадає на вузьку смужку матового скла, розташованого на циферблаті під шкалою, і утворює світлову пляму з індексом нитковидного типу (рис. 3.1). При повороті рухомої частини повертається жорстко скріплене з нею дзеркальце і, відповідно, переміщується під шкалою відлікового пристрою світлова пляма з індексом, вказуючи значення вимірюваної величини.

У приладах з покажчиком у вигляді стрілки, жорстко скріпленої з рухомою частиною вимірювального механізму, відлік значення вимірюваної величини здійснюється за положенням вказуючої частини стрілки біля шкали приладу. Форма вказуючої частини стрілки повинна забезпечувати відлік показників із необхідною точністю.

Залежно від форми вказуючої частини стрілок, найпоширенішими стрілками є клиноподібні (рис. 3.2, а), ножові (рис. 3.2, б) і стрижневі (рис. 3.2, в).

В лабораторних приладах підвищених класів точності при використанні покажчиків у вигляді стрілки, зазвичай ножового типу, для зменшення похибки відліку від паралакса, що виникає через те, що кут зору експериментатора щодо площини шкали приладу відрізняється від прямого, застосовують спеціальні пристрої.

Найбільшого поширення набули так звані відлікові пристрої із дзеркальною шкалою (рис. 3.3).

На циферблаті 1 під шкалою встановлюється на всю довжину шкали вузька смужка дзеркала 2. Експериментатор перед проведенням відліку

зіставляє відбиття стрілки в дзеркалі із самою стрілкою 3. Тільки після цього, тобто після усунення паралакса, здійснюється відлік за шкалою приладу.

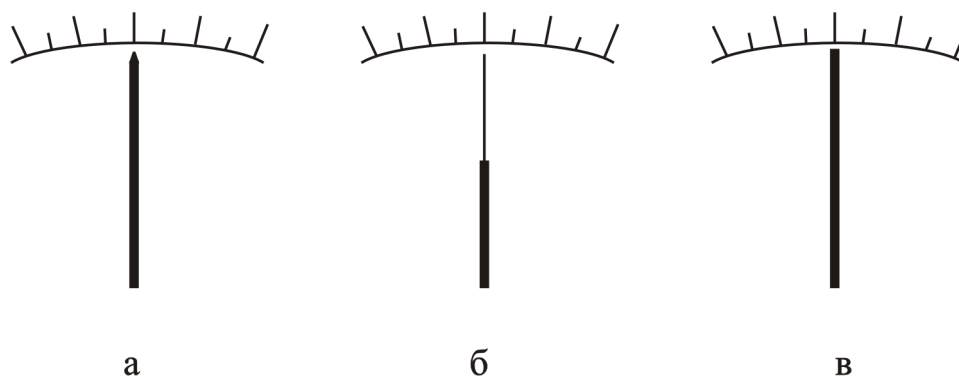


Рис. 3.2 – Відлікові пристрої стрілочних приладів
а – із клиноподібною стрілкою; б – з ножовою стрілкою;
в – зі стрижневою стрілкою

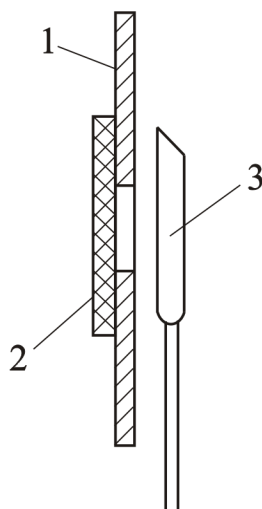


Рис. 3.3 – Відліковий пристрій із дзеркальною шкалою

3.4. Пристрої для створення протидіючого моменту

Протидіючий момент в аналогових вимірювальних приладах створюється в більшості випадків двома способами – за допомогою *протидіючих пружин і розтяжок*.

Протидіючі пружини виконуються у вигляді спіралі з бронзи за ДСТ 9233-79. Один кінець спіральної пружини, внутрішній, прикріплюється до рухомої частини вимірювального механізму, а інший, зовнішній, – до нерухомої частини приладу. Таким чином, обертаючий момент, що виникає у вимірювальному механізмі, закручує протидіючу пружину доти, доки він не буде дорівнювати протидіючому моменту. Найчастіше для створення протидіючого моменту застосовують не одну, а дві пружини, встановлюючи їх з різних боків рухомої частини вимірювального механізму. У випадку застосування двох спіральних

пружин, останні зазвичай використовуються також для підведення струму до рухомої частину приладу.

Розтяжки (ДСТ 9444-74) являють собою металеві стрічки шириною від 0,08 до 0,35 мм і товщиною від 0,01 до 0,04 мм. У якості матеріалу для виготовлення розтяжок використовують різні види бронзи, платини, а також кобальт-нікель-хромовий сплав. Звичайно, використовуються дві розтяжки, що встановлюють із двох сторін рухомої частини. Таким чином, розтяжки не тільки створюють протидіючий момент при повороті рухомої частини під дією обертаючого моменту, але й закріплюють (розтягують) рухому частину. При застосуванні розтяжок немає необхідності в використанні спеціальних опорних пристроїв (кернах, підп'ятниках), які потрібні при застосуванні протидіючих пружин.

Наявність двох розтяжок дозволяє використовувати їх для підведення струму в рухому частину вимірювального механізму.

У реальних приладах одна з розтяжок, так само як і зовнішній кінець однієї зі спіральних протидіючих пружин, прикріплюється не до нерухомої частини приладу, а до спеціального гвинта, що кріпиться на корпусі приладу і називається *коректором*. Поворот коректора на деякий кут у той або інший бік дозволяє змінювати початкове положення рухомої частини приладу і тим самим встановлювати показчик вимкненого приладу на нульову позначку. Застосування розтяжок, що виготовляються на основі сучасної технології, дозволяє запобігти тертю в опорах і підвищити чутливість вимірювальних механізмів.

3.5. Пристрої для створення заспокійливого моменту

Рухома частина, а отже, і показчик відлікового пристрою займають певне положення, що відповідає значенню вимірюваної величини тільки тоді, коли обертаючий момент дорівнює моменту протидіючому. При будь-якій зміні вимірюваної величини змінюється обертаючий момент і, отже, порушується рівність між значеннями обертаючого й протидіючого моментів. Рухома частина вимірювального механізму під дією різниці названих моментів почне переміщуватися в ту або іншу сторону доти, доки не буде рівності між значеннями обертаючого й протидіючого моментів. Час, необхідний для цього, називають *часом заспокоєння* рухомої частини приладу.

Для забезпечення необхідного часу заспокоєння рухомої частини в аналогових приладах застосовують різні пристрої, що створюють заспокійливий момент. До них відносяться *повітряний, магнітоіндукційний або рідинний заспокоювачі*.

Повітряний заспокоювач (рис. 3.4, а) застосовується, головним чином, у приладах старих розробок, що мають рухому частину на осі із протидіючими пружинами. Він являє собою закриту камеру 1, всередині якої переміщується при русі рухомої частини легке алюмінієве крило 2, жорстко закріплене на осі 3 рухомої частини вимірювального механізму. Між алюмінієвим крилом 2 і корпусом 1 є невеличкий зазор. При русі крила повітря переміщується з однієї частини камери в іншу, створюючи заспокійливий момент, що сприяє оптимальному заспокоєнню рухомої частини приладу.

Магнітоіндукційний заспокоювач (рис. 3.4, б) складається з нерухомого постійного магніту 1 з магнітопроводом 2 (можливе застосування декількох постійних магнітів) і крила заспокоювача 3, жорстко скріпленого з рухомою частиною приладу. Крило заспокоювача виконане з немагнітного матеріалу, звичайно алюмінію.

При відхиленні рухомої частини, а отже, і крила заспокоювача, в останньому при перетинанні поля постійного магніту наводяться вихрові струми. Взаємодія цих струмів з полем постійного магніту створює заспокійливий момент.

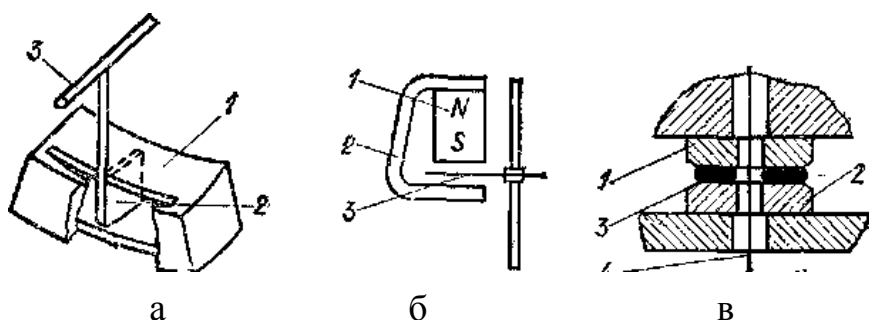


Рис. 3.4 – Заспокоювачі

а – повітряний; б – магнітоіндукційний; в – рідинний

Магнітоіндукційний заспокоювач за конструкцією простіше повітряного заспокоювача і більш зручний при регулюванні заспокійливого моменту. Однак застосування магнітоіндукційного заспокоювача можливо лише в приладах, де поле постійного магніту не буде істотно впливати на роботу вимірювального механізму.

Рідинний заспокоювач застосовується, головним чином, у приладах, що мають малі розміри за висотою, однак останнім часом його стали застосовувати й у приладах звичайного габариту. Рідинний заспокоювач (рис. 3.4, в) складається із двох дисків. Диск 1 закріплюється на рухомій частині приладу, а диск 2 – на нерухомій частині. Проміжок між дисками зазвичай становить 0,1–0,15 мм. Між дисками заливається спеціальна маловисихаюча кремнійорганічна рідина 3. Рідина в проміжку утримується поверхневим натягом. Для запобігання

витікання рідини із проміжку поверхні дисків, що зіштовхуються з рідиною, ретельно поліруються.

Завдяки певній в'язкості застосовуваної рідини при відхиленні рухомої частини, тобто при обертovому русі диска 1 щодо диска 2, через тертя між шарами рідини виникає заспокійливий момент.

Рідинний заспокоювач застосовується, головним чином, у приладах, в яких рухома частина укріплена на розтяжках. Розтяжка 4 проходить крізь невеликі отвори, зроблені в дисках.

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПРИЛАДИ. ВИМІРЮВАЛЬНІ МЕХАНІЗМИ ПРИЛАДІВ І ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

В електромеханічних приладах енергія вимірюваної величини перетворюється в механічну.

Електромеханічний прилад містить у собі (рис. 4.1):



Рис. 4.1 – Загальна структурна схема електромеханічного приладу

ВП – вхідний перетворювач (поділювач напруги, шунти, діоди і т.д.);

ВМ – вимірювальний механізм, що складається з рухомої і нерухомої частини;

ПВ – відліковий пристрій (шкала із числовими позначками).

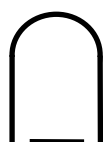
X – вхідна (вимірювана) величина;

Y_1 – перетворена величина;

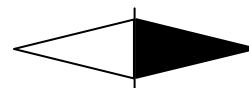
Y_2 – величина, перетворена в механічну (кутове переміщення рухомої частини).

4.1. Прилади магнітоелектричної системи

В основі дії цих приладів лежить принцип взаємодії магнітного поля, створюваного постійним магнітом, з вимірюваним струмом, що протікає по рухомій рамці. Використовують магнітоелектричні прилади з рухомою рамкою і рухомим магнітом (рис. 4.2, а і 4.2, б відповідно).



а



б

Рис. 4.2 – Графічні позначення приладів магнітоелектричної системи
а – з рухомою рамкою; б – з рухомим магнітом

Найпоширенішими є механізми із рухомою рамкою.

Вимірювальний механізм приладу магнітоелектричної системи складається з п'яти основних частин (рис. 4.3).

- 1 – постійний магніт;
- 2 – полюсні наконечники;
- 3 – сталевий циліндр;
- 4 – алюмінієва рамка, наклеєна на сталевий циліндр.
- 5 – спіральні пружини, через які подається вимірюваний струм в рамку.

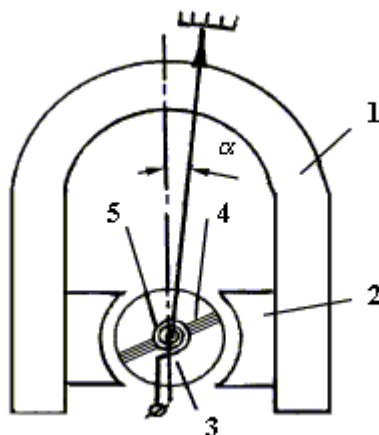


Рис. 4.3 – Будова приладу магнітоелектричної системи

Принцип дії

У проміжку між полюсними наконечниками та сердечником, де діє сильне магнітне поле, встановлюється рамка.

Вимірюваний струм пропускають крізь рамку, при цьому провідники зі струмом опиняються в полі постійного магніту, де на них діє сила, прямо пропорційна магнітній індукції поля та силі струму в провіднику. Ця взаємодія викликає обертаючий момент, під дією якого рамка, а разом з нею й циліндр, почнуть повертатися. Спіральні пружини створюють протидіючий момент. Якщо обертаючий момент дорівнює протидіючому, то покажчик стрілки відхилиться на кут α , пропорційний сталій силі струму в рамці.

Рівняння шкали

$$\alpha = S \cdot I, \quad (4.1)$$

де S – чутливість приладу, що показує, на який кут відхиляється стрілка приладу при зміні сили струму I на одиницю.

Як видно з рівняння шкали, шкала магнітоелектричного приладу рівномірна. Також можна зробити висновок, що за допомогою магнітоелектричних приладів можна вимірювати тільки постійні струм і напругу, а також опір.

Переваги

- 1) Рівномірна шкала.
- 2) Має сильне власне магнітне поле (не має потреби в захисті).
- 3) Споживає малі струми та відноситься до приладів з малими власними втратами.
- 4) Велика чутливість, тому можуть виконувати роль нульових покажчиків.

Недоліки

- 1) Складність конструкції.
- 2) Не розраховані на перевантаження.
- 3) Робота тільки в колах постійного струму.

Промисловість випускає магнітоелектричні амперметри й вольтметри щитові та переносні, односторонні та багаторонні всіх класів точності від 0,1 і нижче.

Гальванометри магнітоелектричної системи

Гальванометром називається електровимірвальний прилад, що має високу чутливість до струму або напруги. Гальванометри широко використовуються в електровимірвальній техніці в якості нуль-індикатора, а також для вимірювань малих струмів і напруг.

У гальванометрів чутливість підвищена за рахунок значного зменшення протидіючого моменту, для чого рухому рамку приладу встановлюють на розтяжках або підвісках з тонкого дроту, чим досягається малий питомий протидіючий момент.

Крім цього, для гальванометрів використовують постійні магніти з найбільшою магнітною індукцією, що також підвищує чутливість приладу.

Балістичні гальванометри дозволяють вимірювати малі кількості електрики Q (імпульси струму), що протікають протягом коротких проміжків часу – часток секунди.

Рівняння шкали балістичного гальванометра:

$$\alpha = S_Q \cdot I, \quad (4.2)$$

де S_Q – балістична чутливість, що на відміну від чутливості струму залежить від опору зовнішнього кола, на якому замкнений гальванометр. Чутливість S_Q підвищується зі збільшенням опору зовнішнього кола, тому перед застосуванням гальванометра необхідно визначити його балістичну сталу при тому опорі кола, при якому гальванометр буде працювати.

Логометр магнітоелектричної системи

Логометр магнітоелектричної системи – прилад без протидіючої пружини, що має дві рухомі рамки, розташовані під кутом одна до одної на загальній осі (рис. 4.4). Живлення до котушок подається через тонкі стрічки, що не створюють протидіючого моменту. При протіканні струмів через котушки створюються два протилежно спрямованих обертаючих моменти.

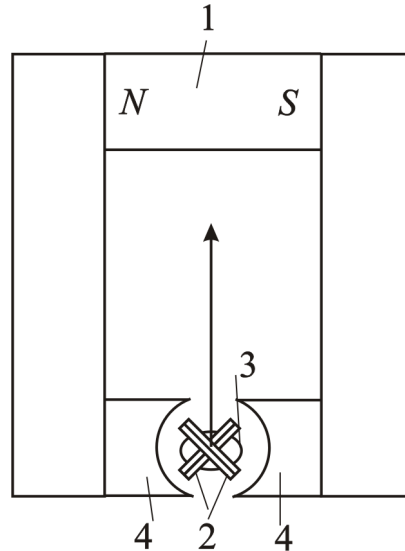


Рис. 4.4 – Будова магнітоелектричного логометра

1 – постійний магніт; 2 – рухомі рамки; 3 – сердечник; 4 – полюсні наконечники.

Рівняння шкали

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \quad (4.3)$$

Кожному відношенню струмів у рамках відповідає певний кут відхилення стрілки.

Логометри магнітоелектричної системи широко використовуються при вимірюванні опору (мегомметри, омметри).

4.2. Прилади електромагнітної системи

Це прилади, в яких обертаючий момент виникає в результаті взаємодії поля електромагніта з феромагнітним сердечником.

Існують три конструкції електромагнітних вимірювальних механізмів: із плоскою котушкою (рис. 4.5, а), із круглою котушкою (рис. 4.5, б) і із замкнутим магнітопроводом (рис. 4.5, в). Із названих механізмів останній є найбільш досконалим.

Будова механізму із плоскою котушкою:

1 – неферомагнітний каркас із котушкою з товстого дроту;

2 – феромагнітний сердечник (пластина);

3 – вісь із опорами.

Будова механізму із круглою котушкою:

2 – рухомий сердечник;

4 – стрілка;

6 – нерухомий сердечник.

Будова механізму із замкнутим магнітопроводом:

1 – котушка;

2 – рухомий сердечник з магнітом'якої сталі або пермалоя;

3 – нерухомий магнітопровід;

4, 5 – полюсні наконечники.

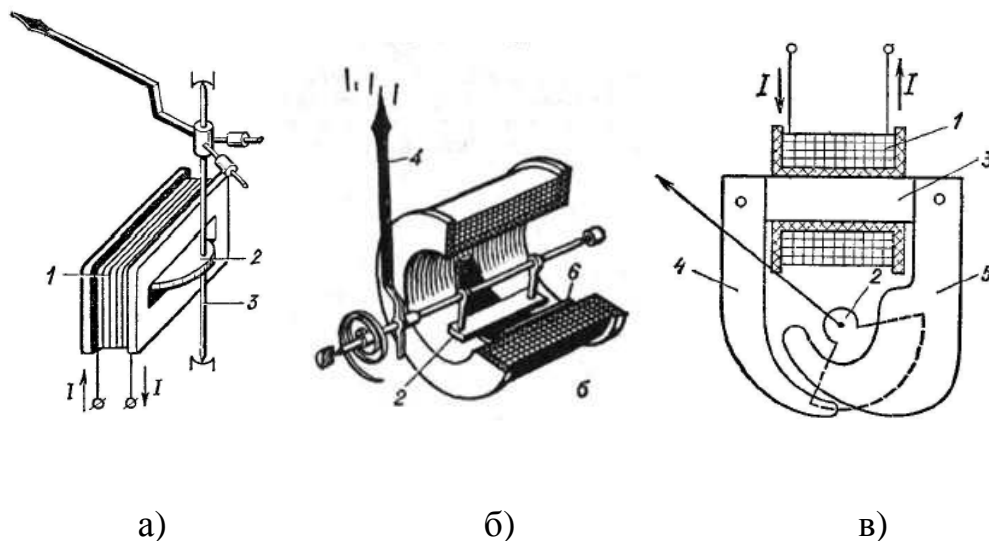


Рис. 4.5 – Будова механізмів приладів електромагнітної системи
а – із плоскою котушкою; б – із круглою котушкою;
в – із замкнутим магнітопроводом

Принцип дії

Принцип дії електромагнітних вимірювальних приладів розглянемо на прикладі механізму із плоскою котушкою (рис. 4.5, а). Вимірюваний струм, що протікає через котушку 1, створює намагнічуючу силу, ця сила зтягує феромагнітний сердечник 2 всередину котушки, що викликає поворот стрілки приладу.

Для створення протидіючого моменту використовуються протидіючі пружини (як показано на рис. 4.5, б) або розтяжки. Для зупинення коливань рухомої частини в електромагнітних вимірювальних механізмах зазвичай використовують повітряні або рідинні заспокоювачі.

Рівняння шкали

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot W} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2 = A \cdot I^2 = S \cdot I, \quad (4.4)$$

де W – енергія, створювана протидіючими пружинами або розтяжками; L – індуктивність котушки; A – стала приладу, залежна від питомого протидіючого моменту, конструкції й розмірів котушки та магнітної проникності середовища, що знаходиться усередині котушки; $S = A \cdot I$ – чутливість електромагнітного приладу.

Із рівняння шкали видно, що кут відхилення стрілки залежить від квадрата струму, тому приладами електромагнітної системи можна вимірювати як постійний струм, так і змінний. Електромагнітні вимірювальні механізми використовуються в амперметрах і вольтметрах.

Переваги

- 1) Простота конструкції.
- 2) Можуть вимірювати більші струми, тому що котушки нерухомі та їх можна намотати провідником великого січення.
- 3) Витримують як короткочасні, так і тривалі навантаження.
- 4) Можуть працювати в колах постійного і змінного струму.

Недоліки

- 1) Нерівномірність шкали і відносно низька чутливість при вимірюваннях малих струмів.
- 2) Залежність показників приладу від впливу зовнішніх магнітних полів.
- 3) Низький частотний діапазон вимірювань.
- 4) Велике власне споживання енергії.

Промисловість випускає: переносні амперметри класу точності 0,5 з верхньою межею вимірювань від 10мА до 10А на частоти до 1500 Гц; щитові однограничні амперметри класів точності 1,0; 1,5; 2,5 на струми до 300 А з вбудованими трансформаторами струму; переносні вольтметри класу точності 0,5 з верхньою межею вимірювань від 1,5 до 600 В; щитові вольтметри класів точності 1,0; 1,5; 2,5 з верхніми межами вимірювань від 0,5 до 600 В безпосереднього включення і до 450 кВ із трансформаторами напруги на різні фіксовані частоти від 50 до 1000 Гц.

Логометр електромагнітної системи

Широкого використання на змінному струмі набули електромагнітні логометри. Електромагнітні логометричні механізми бувають двохмоментні й трьохмоментні.

Двохмоментний логометр електромагнітної системи (рис. 4.6), складається із двох нерухомих котушок і двох сердечників, закріплених на одній осі. Котушки зі струмами й сердечниками закріплені так, що при збільшенні кута повороту α і зміні положення сердечників щодо котушок індуктивність однієї котушки зростає, а іншої спадає. Обертаючі моменти, що діють на сердечники, спрямовані в протилежні боки. Для статичної рівноваги, при якій обертаючі моменти, створювані першою й другою котушками, рівні $M_1=M_2$, можна записати:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{dL_1}{d\alpha} \cdot I_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL_2}{d\alpha} \cdot I_2^2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = f(\alpha), \quad (4.5)$$

де L_1 і L_2 , I_1 і I_2 – відповідно індуктивності та струми першої та другої котушок.

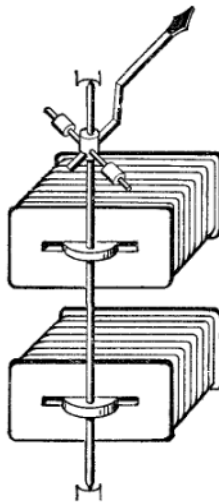


Рис. 4.6 – Будова двохмоментного магнітоелектричного логометра

Електромагнітні вимірювальні логометричні механізми використовуються в фазометрах і частотомірах, але менш поширені, ніж логометри магнітоелектричної й електродинамічної систем.

4.3. Електродинамічні прилади

Це прилади, в яких обертаючий момент створюється за рахунок взаємодії магнітних полів нерухомих і рухомих котушок зі струмами (рис. 4.7).

На рис. 4.7 показані будова і зовнішній вигляд електродинамічного вимірювального механізму. На рисунку позначені:

1 – нерухома котушка з товстого дроту з малою кількістю витків;

2 – рухома котушка з тонкого дроту з великою кількістю витків.

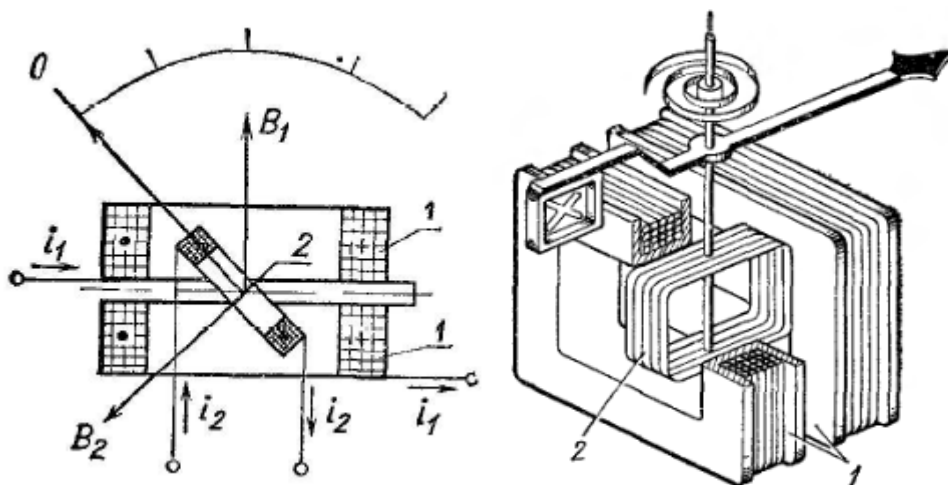


Рис. 4.7 – Будова механізму електродинамічного приладу

Нерухома котушка 1 зазвичай складається із двох однакових частин, розділених повітряним проміжком. Нерухома котушка виготовляється з товстого дроту, намотаного на ізоляційний каркас. Рухома котушка 2 виконується безкаркасною з мідного або алюмінієвого дроту. Для введення обмотки рухомої котушки в коло вимірюваного струму використовують спіральні пружинки (як показано на рис. 4.7) або розтяжки.

Власне магнітне поле електродинамічного вимірювального механізму невелике, тому для захисту від впливу зовнішніх полів використовують екранування (вимірювальний механізм розташовують всередині одного або двох екранів з феромагнітного матеріалу) або астазування (використовується астатичний вимірювальний механізм, що складається із двох пар котушок, причому магнітні поля нерухомих котушок спрямовані взаємно протилежно).

Принцип дії

При протіканні струму i_1 по нерухомій котушці створюється магнітний потік, що взаємодіє зі струмом рухомої котушки. При протіканні струму i_2 через рухому котушку в ній виникає електромагнітна сила, що діє на кожний її виток. Сили, що виникли, прагнуть повернути рухому котушку, а разом з нею й стрілку приладу так, щоб магнітні потоки рухомої й нерухомої котушок збігалися. Для заспокоєння рухомої частини використовують повітряні або магнітоіндукційні заспокоювачі.

Рівняння шкали для постійного струму

$$\alpha = \frac{1}{W} \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cdot I_1 \cdot I_2 = S \cdot I_1 \cdot I_2, \quad (4.6)$$

де $M_{1,2}$ – взаємна індукція між нерухомою і рухомою котушками; I_1 і I_2 – струми відповідно нерухомої і рухомої котушок.

Рівняння шкали для змінного струму

$$\alpha = \frac{1}{W} \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos\psi = S \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos\psi, \quad (4.7)$$

де ψ - кут зсуву між струмами нерухомої та рухомої котушок.

У колах змінного струму обертаючий момент електродинамічного механізму залежить від миттєвих або діючих значень.

Електродинамічними приладами можна вимірювати струми, напруги й потужності в колах змінного і постійного струму.

1. Вимірювання струму

При вимірюваннях малих струмів (до 0,5 А) котушки включаються послідовно (рис. 4.8, а), при цьому $I_1=I_2$.

При вимірюваннях великих струмів (більше 0,5 А) котушки включаються паралельно (рис. 4.8, б). У кола котушок включаються такі додаткові резистори, щоб кут зсуву фаз між струмами в котушках дорівнював нулю. У цьому випадку струм у кожній котушці пропорційний загальному струму в колі.

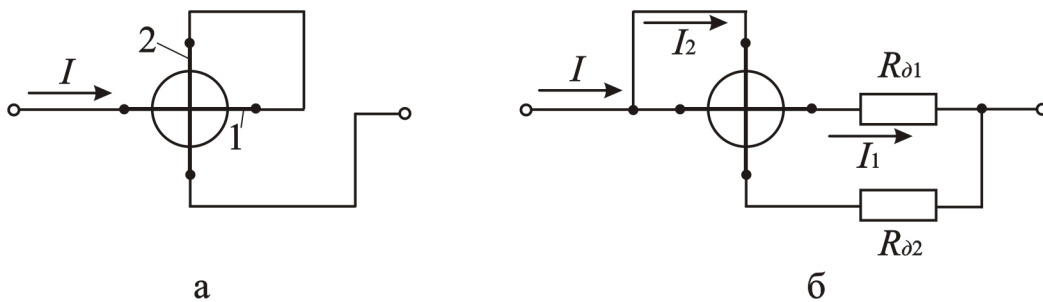


Рис. 4.8 – Включення котушок електродинамічного приладу при вимірюванні струму

Рівняння шкали

$$\alpha = S_A \cdot I^2, \quad (4.8)$$

де S_A – чутливість амперметра струму.

2. Вимірювання напруги

В електродинамічних вольтметрах нерухома і рухома котушки з'єднані послідовно разом з додатковим резистором (рис. 4.9). Секціонуванням додаткового резистора можна одержати різні межі вимірювання.

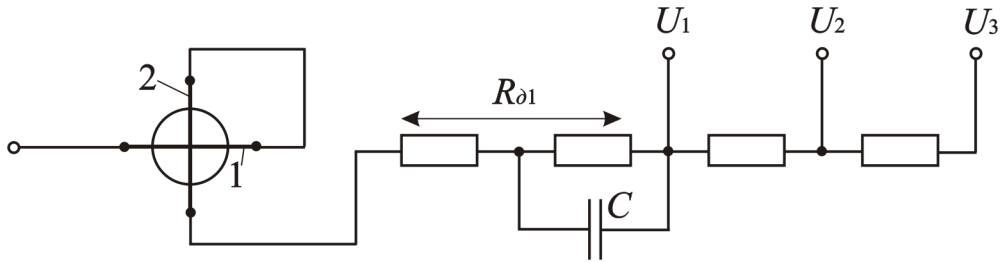


Рис. 4.9 - Включення котушок електродинамічного приладу при вимірюванні напруги

Рівняння шкали

$$\alpha = S_V \cdot U^2, \quad (4.9)$$

де S_V – чутливість вольтметра напрузі.

3. Вимірювання потужності

Початки намоток котушок (генераторні затискачі) з'єднують між собою і включаються з боку живлення, при цьому нерухома котушка включається послідовно з навантаженням, а рухома – паралельно (рис. 4.10). Для обмеження струму рухомої котушки послідовно з нею включається додатковий резистор.

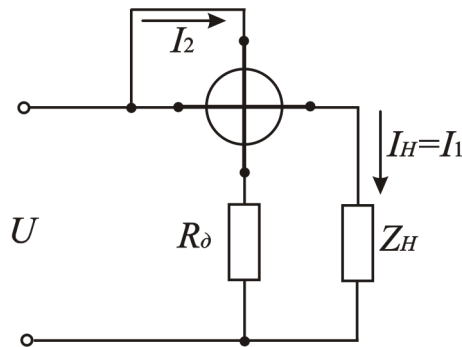


Рис. 4.10 – Включення котушок електродинамічного приладу при вимірюванні потужності

Рівняння шкали в колі постійного струму

$$\alpha = S_P \cdot P, \quad (4.10)$$

де S_P – чутливість ватметра.

Рівняння шкали в колі змінного струму

$$\alpha = S_p \cdot P \cdot \cos \varphi, \quad (4.11)$$

де φ – кут зсуву між струмом нерухомої котушки і напругою рухомої котушки.

Переваги

- 1) Працюють у колах змінного і постійного струму.
- 2) Висока точність вимірювань у колах постійного струму.
- 3) Рівномірність шкали при вимірюванні потужності.
- 4) Можливість використання для обліку електроенергії в колах постійного струму.
- 5) Вимірювання активної й реактивної потужності в колах змінного струму.

Недоліки

- 1) Нерівномірність шкали при вимірюваннях струму і потужності.
- 2) Велике власне споживання потужності.
- 3) Незахищеність від зовнішніх магнітних полів.
- 4) Залежність показників приладів від частоти струму й температури навколишнього середовища.
- 5) Обмеженість меж вимірювань за струмом і напругою через близьке розташування котушок.

Зазначені властивості електродинамічних механізмів дозволяють на їх основі випускати лабораторні багатограничні прилади високих класів точності (0,5; 0,2; 0,1) для вимірювань на постійному і змінному струмі. Випускаються міліамперметри та амперметри з межами від 1 мА до 10 А на частоти до 10 кГц, багатограничні вольтметри з межами від 1,5 до 600 В на частоти до 5 кГц, багатограничні однофазні ватметри з межами за струмом від 25 мА до 10 А і за напругою від 15 до 600 В.

Електродинамічний логометр

Пристрій електродинамічного логометра показаний на рис. 4.11.

Прилад має дві рухомі й дві нерухомі котушки. Рухомі котушки закріплені на одній осі та живляться через тонкі стрічки, що не створюють протидіючого моменту. При роботі логометра нерухомі котушки включаються послідовно в коло з навантаженням, рухомі котушки включаються паралельно навантаженню, але послідовно з додатковими опорами (рис. 4.11). При взаємодії струму нерухомих котушок I_H зі струмами рухомих котушок I_1 і I_2 створюються два обертаючі моменти M_1 і M_2 .

Котушки приладу розташовують так, що при певному напрямку струмів I_1 і I_2 напрямки моментів M_1 і M_2 протилежні. Тому рухома система приладу відхиляється разом зі стрілкою вбік дії більшого обертаючого моменту доти, доки моменти не врівноважаться.

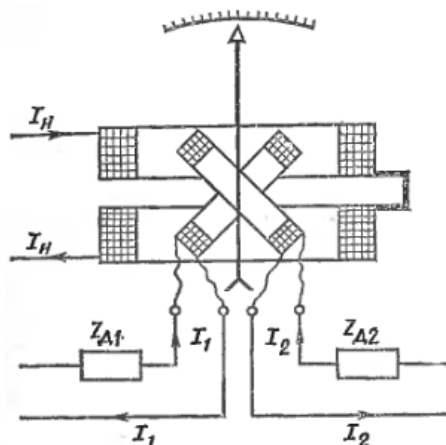


Рис. 4.11 – Будова електродинамічного логометра

Рівняння шкали

$$\alpha = S \cdot \frac{I_1 \cdot \cos \psi_1}{I_2 \cdot \cos \psi_2}, \quad (4.12)$$

де ψ_1 і ψ_2 – кути зсуву фаз між струмами, що протікають у рухомих котушках і струмом нерухомої котушки.

Електродинамічні логометри застосовуються при виготовленні щитових і переносних фазометрів і частотомірів промислової частоти.

4.4. Феродинамічні прилади

Відрізняються від електродинамічних тим, що нерухома й рухома котушки мають свої магнітопроводи, виконані з фероматеріалу, тому магнітні поля котушок значно сильніші. Ці магнітні поля, взаємодіючи між собою, викликають появу обертаючого моменту на осі рухомої котушки. Рухома система разом зі стрілкою повертається доти, доки обертаючий момент не врівноважиться протидіючим моментом.

На рис. 4.12 зображені дві конструкції феродинамічних механізмів: з однією котушкою (рис. 4.12, а) і з двома котушками (рис. 4.12, б).

Рівняння шкали

$$\alpha = \frac{c}{W} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \psi = S \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \psi, \quad (4.13)$$

де c – коефіцієнт, обумовлений конструктивними параметрами і вибором системи одиниць.

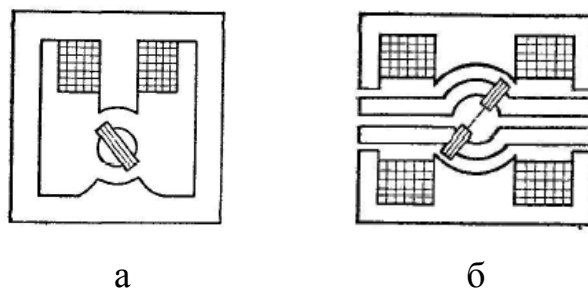


Рис. 4.12 – Конструкції феродинамічних приладів
а – з однією катушкою; б – з двома катушками

Переваги

- 1) Не піддаються впливу зовнішніх магнітних полів.
- 2) Менше ніж в електродинамічних приладах власне споживання потужності.
- 3) Більший ніж в електродинамічних приладах обертаючий момент.

Недоліки

- 1) Відносно мала точність.
- 2) Менший ніж в електродинамічних приладів частотний діапазон.

Зазначені властивості феродинамічних приладів визначають галузь їх застосування – у якості щитових і переносних приладів змінного струму, а також як самописні прилади. Промисловість випускає щитові феродинамічні амперметри й вольтметри класів точності 1,5 і 2,5, переносні амперметри й вольтметри класу 0,5, щитові й переносні ватметри класів точності 0,2 і 0,5. Застосовуються вони переважно на змінному струмі промислової частоти.

4.5. Прилади індукційної системи

Це прилади, у яких змінні магнітні поля взаємодіють зі струмами, індукованими ними в металевому диску, в результаті цього створюється обертаючий момент, що діє на диск. Застосовуються як лічильники електроенергії.

На рис. 4.13 представлена конструкція приладу індукційної системи.

- 1, 4 – два магнітопроводи: на один намотана обмотка із дроту великого січення з малим числом витків, а на іншій – малого січення з більшим числом витків.
- 2 – черв'як, що передає рух диска на рахунковий пристрій;
- 3 – рахунковий пристрій;
- 5 – постійний магніт (створює протидіючий момент);
- 6 – алюмінієвий диск.

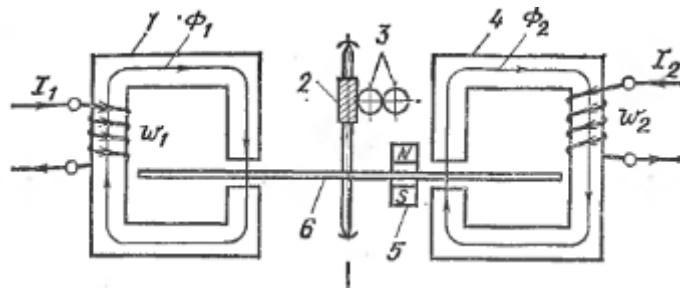


Рис. 4.13 – Будова механізмів індукційної системи

Принцип дії

Змінний струм, що протікає в першій котушці, створює магнітний потік, що пронизує алюмінієвий диск і в ньому наводиться ЕДС індукції. Під дією наведеної ЕДС в алюмінієвому диску виникають вихрові струми. Від взаємодії цих вихрових струмів з магнітним полем другої котушки виникає електромагнітна сила, що прагне повернути алюмінієвий диск. Аналогічно протікають фізичні процеси з вихровими струмами, наведеними магнітним полем другої котушки. Результуючий обертаючий момент пропорційний добутку магнітних потоків, що пронизують алюмінієвий диск і синусу кута зсуву фаз ψ між ними:

$$M_{BP} = M_{BP1} - M_{BP2} = k \cdot f \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \sin \psi, \quad (4.14)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від геометричних розмірів магнітопроводів, їх матеріалу і розташування, від числа витків котушок, опору алюмінієвого диску та інших факторів; f – частота струму.

Рівняння шкали

$$\alpha = \frac{k}{W} \cdot f \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \psi = S \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \psi. \quad (4.15)$$

Перевага індукційних вимірювальних механізмів полягає в зручності їх використання в інтегруючих приладах, таких як лічильники змінного струму.

Недоліки

- 1) Залежність від частоти й зовнішніх магнітних полів.
- 2) Велике власне споживання потужності.

4.6. Електростатичні прилади

Робота приладів ґрунтується на взаємодії між зарядженими тілами, одне з яких є рухомим. В електростатичних вимірювальних механізмах, на відміну від механізмів інших систем, переміщення рухомої частини здійснюється за рахунок

дії безпосередньо прикладеної напруги. Тому електростатичні механізми застосовуються в вольтметрах.

В електростатичних вимірювальних механізмах відхилення рухомої частини пов'язане зі зміною ємності. Практичне застосування одержали механізми, у яких зміна ємності відбувається або внаслідок зміни відстані між зарядженими пластинами (рис. 4.14, а) або зміни активної площі пластин (рис. 4.14, б). Перший тип механізмів використовується для створення кіловольтметрів, а другий – для вольтметрів (у десятки й сотні вольт).

На рис. 4.14 прийняті наступні позначення:

- 1 – дротик;
- 2 – спеціальна тяга
- 3, 5 – нерухомий електрод;
- 4 – рухомий електрод;
- 6 – стрілка;
- 7 – два паралельно розташованих електроди;
- 8 – рухомий електрод.

Принцип дії

Роботу електростатичного механізму розглянемо на прикладі рис. 4.14, а. На електродах 3, 4, 5 накопичуються заряди: додатні й від'ємні. У результаті взаємодії зарядів рухомий електрод 4 починає рухатися, через спеціальну тягу 2 і дротик 1 рух передається на стрілку. Стрілка буде відхилятися доти, доки обертаючий момент не врівноважиться протидіючим моментом, створюваним спіральними пружинками.

Для заспокоєння рухомої частини механізму частіше застосовують магнітоіндукційні заспокоювачі.

Рівняння шкали

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot W} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 = S \cdot U, \quad (4.16)$$

де C – ємність; S – чутливість електростатичного приладу.

Електростатичні вимірювальні механізми застосовуються у вольтметрах постійного і змінного струмів.

Розширення меж виміру на змінному струмі здійснюється за рахунок включення ємнісного поділювача напруги, а на постійному – резистивного.

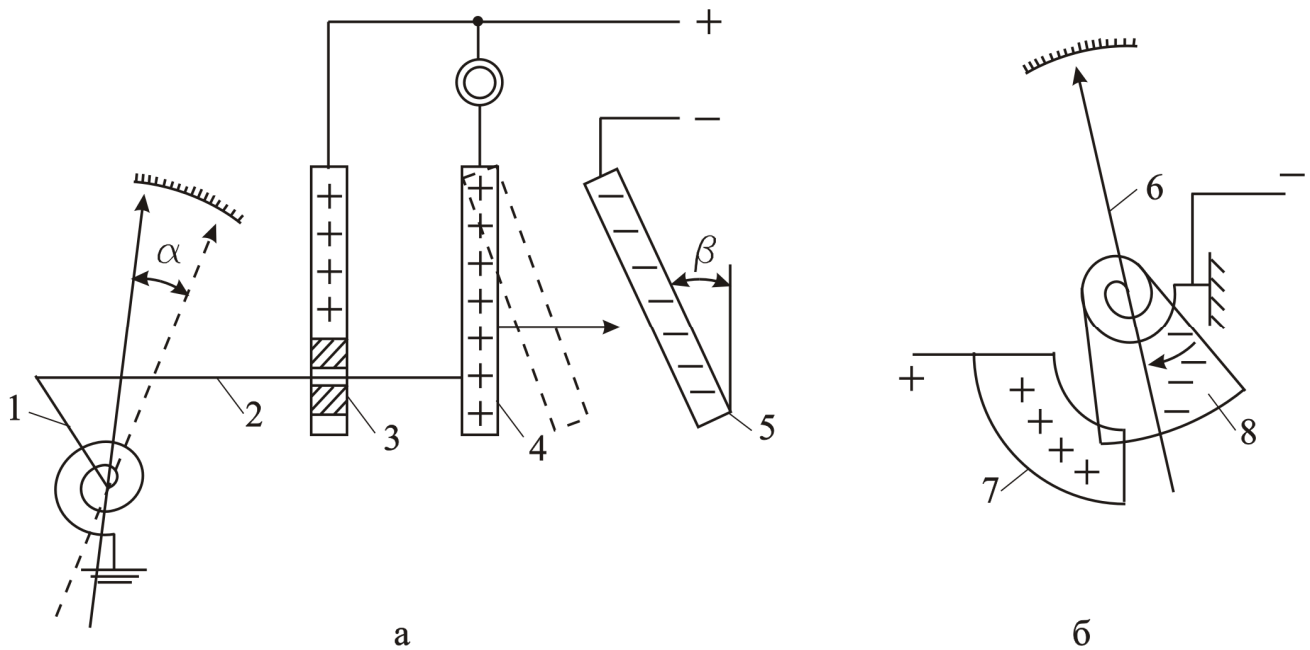


Рис. 4.14 – Будова механізмів електростатичної системи
 а – змінюється відстань між зарядженими тілами;
 б – змінюється активна площа заряджених пластин

Переваги

- 1) Показники не залежать від частоти й форми вимірюваної напруги, а також температури.
- 2) Працює в широкому діапазоні вимірюваних напруг від мВ до кВ.
- 3) Практично не споживають активну потужність.

Недоліки

- 1) Нерівномірність шкали.
- 2) Залежність від електричних і електростатичних полів (необхідно екранувати).
- 3) Мала чутливість і звідси невисока точність.

Промисловість випускає переносні та щитові, односторонні й багаторічні електростатичні вольтметри класів точності 0,5; 1,0; 1,5 на напругу від 10 В до 300 кВ і частоти до 10 МГц, що мають вхідну ємність від 4 до 65 пФ і вхідний опір $10^{10} - 10^{12}$ Ом.

У додатку Б наведені основні характеристики й способи застосування вимірювальних приладів наведених вище механізмів.

РОЗДІЛ 5. ЕЛЕКТРОННІ АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Являють собою засоби вимірювань, в яких перетворення сигналів вимірювальної інформації здійснюється за допомогою аналогових електронних пристроїв. Показники цих приладів є безперервною функцією зміни вимірюваної величини.

Електронні вимірювальні перетворювачі та пристрої в якості вихідних пристроїв використовують магнітоелектричні механізми або електронно-променеві трубки.

Найбільш широко серед аналогових електронних вимірювальних приладів використовуються електронні вольтметри, осцилографи, частотоміри, фазометри, аналізатори спектру, прилади для вимірювань параметрів електричних і електронних схем (опорів, ємностей, індуктивностей).

Прилади, що випускаються промисловістю, поділяються на 20 підгруп, які позначають прописними буквами, наприклад, (*підгрупа В*: В2 – вольтметри постійного струму, В3 – вольтметри змінного струму, В4 – вольтметри імпульсного струму, В7 – вольтметри універсальні; *підгрупа Г*: Г3 – генератори гармонійних коливань низькочастотні, Г4 – генератори гармонійних коливань високочастотні, Г5 – генератори імпульсів; *підгрупа Е*: Е3 – вимірювачі індуктивності, Е6 – вимірювачі опорів, Е7 – вимірювачі ємностей; *підгрупа З*: З – універсальні осцилографи, З7 – осцилографи швидкісні, стробоскопічні; *підгрупа Ф*: Ф2 – вимірювачі фазового зсуву; *підгрупа Ч*: Ч3 – частотоміри електронно-рахункові).

У позначенні комбінованого приладу, призначеного для виміру декількох величин, до основного позначення підгрупи прийнято додавати букву К.

5.1. Електронні вольтметри

До складу електронних вольтметрів входять підсилювачі постійної та змінної напруг, перетворювачі змінної напруги в постійну (випрямлячі) і постійної в змінну (інвертори), поділювачі напруги. В якості вихідних пристроїв найчастіше використовується магнітоелектричний вимірювальний механізм.

Метрологічні характеристики вольтметра (чутливість, діапазон частот вимірюваних напруг) визначаються типом і характеристиками підсилювача.

Електронні вольтметри постійної напруги в якості вихідного вимірювального механізму мають магнітоелектричні мікроамперметри зі струмом повного відхилення 50-500 мкА й опором рамки 500-1000 Ом. Структурна схема електронного вольтметра постійного струму подана на рис. 5.1. Вимірювана напруга U_x подається на вхідний пристрій, що представляє

собою багатограничний високоомний подільвач на резисторах. Із подільвача напруга надходить на підсилювач постійного струму й далі – на вимірювальний механізм. Подільвач і підсилювач постійного струму доводять рівень напруги до значень, необхідних для нормальної роботи вимірювального механізму.



Рис. 5.1 – Структурна схема електронного вольтметра постійного струму

Вхідний опір електронного вольтметра становить зазвичай кілька десятків мегаомів. Це дозволяє робити виміри в високоомних колах без помітного споживання потужності від об'єкта виміру. Діапазон вимірюваних напруг від десятка мілівольтів до декількох кіловольтів. Для вимірювань малих напруг використовують мікрвольтметри з перетворенням постійного струму в змінний. У таких приладах підсилення вимірюваного сигналу здійснюється на змінному струмі, що дозволяє досягти більших значень коефіцієнта підсилення й знизити поріг чутливості до декількох мікрвольт. Робочий діапазон електронних мікрвольтметрів лежить у межах 10^{-8} -1 В.

Електронні вольтметри змінного струму виготовляються за двома схемами, що представлені на рис. 5.2.

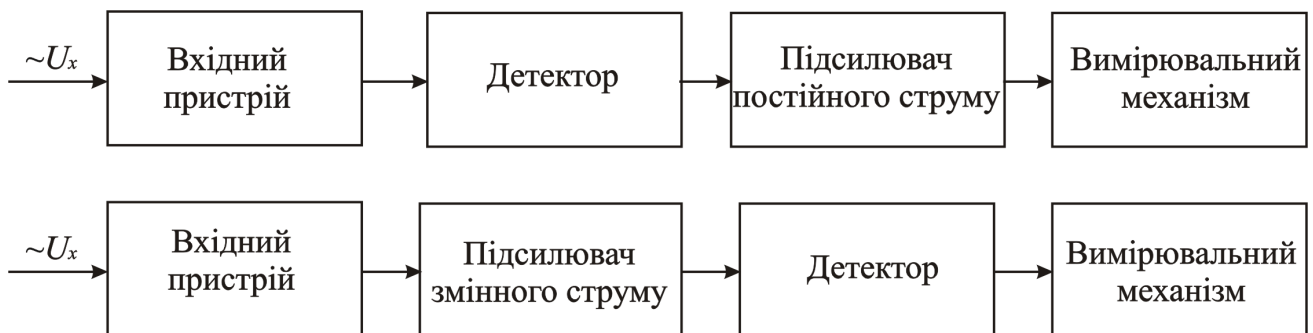


Рис. 5.2 – Структурні схеми електронного вольтметра змінного струму

У першій з цих схем вимірювана змінна напруга спочатку перетворюється в постійну за допомогою детектора, а потім підвищується підсилювачем постійного струму й впливає на вимірювальний механізм. У другій схемі підсилення відбувається на змінному струмі, а потім попередньо підсилений сигнал випрямляється детектором і відхиляє стрілку вимірювального механізму. За першою схемою можуть будуватися вольтметри з широким частотним діапазоном (10 Гц - 1000 МГц), але не здатні вимірювати напруги більші декількох десятків часток вольт. Друга схема дозволяє створювати чутливі

вольтметри, нижня межа вимірювань яких становить одиниці мікрвольт. Однак ці прилади мають менший частотний діапазон.

Переваги

- 1) Великий вхідний опір (більше 1 МОм).
- 2) Мале споживання потужності.
- 3) Висока чутливість.
- 4) Широкий діапазон вимірюваних напруг (від десятків нановольтів на постійному струмі до десятків кіловольтів на змінному).
- 5) Працюють у широкому частотному діапазоні до сотень МГц.

До *недоліків* електронних вольтметрів можна віднести необхідність окремого джерела живлення й складність самої конструкції.

На рис. 5.3 як приклад представлені фотографії сучасних електронних аналогових вольтметрів: мікрвольтметра ВЗ-57 (рис. 5.3, а) і мілівольтметра АВМ-1071. Мікрвольтметр ВЗ-57 має такі технічні характеристики: межа вимірювань від 0,01 мВ до 300 В; частотний діапазон від 5 Гц до 5 МГц; клас точності залежно від межі вимірювань від 1 до 4; вхідний опір/ємність 5 МОм/27 пФ, споживана потужність 20 ВА. Характеристики мілівольтметра АВМ-1071: межа вимірювань від 300 мкВ до 100 В; діапазон робочих частот від 10 Гц до 2 МГц; похибка вимірювань $\pm 3\%$ (відносно 1 кГц).



Рис. 5.3 – Зовнішній вигляд електронних аналогових вольтметрів
а – мікрвольтметр ВЗ-57; б – мілівольтметр АВМ-1071

5.2. Електронно-променевий осцилограф

Електронно-променевий осцилограф – прилад, призначений для візуального спостереження електричних процесів, представлених у формі напруги, а також вимірювань параметрів сигналів, що визначають їх миттєві значення і часові характеристики. Крім того, осцилограф може бути використаний для вимірювань фазового зсуву між двома синусоїдальними напругами, частоти і складових комплексного опору.

Електронний осцилограф має високу чутливість, широкий частотний діапазон і малі власні споживання потужності. Осцилографи мають наступні класи точності: 1 клас ($\pm 3\%$); 2 клас ($\pm 5\%$); 3 клас ($\pm 10\%$); простий клас ($\pm 12\%$). Точність вимірювань залежить від розміру робочої частини екрана та ширини променя й вказується для випадку, коли розміри зображення займають не менш 30% розміру екрана.

Сучасний універсальний осцилограф має смугу пропускання до 350 МГц і діапазон амплітудних досліджень сигналів від мілівольтів до сотень вольтів.

За призначенням і галуззю застосування універсальні осцилографи поділяються на багатофункціональні зі змінними блоками, широкосмугові, низькочастотні, двопробеневі, прецизійні, польові. За допомогою низки осцилографів можна вимірювати частоту, струм, напругу, температуру.

Спрощена функціональна схема осцилографа представлена на рис. 5.4. На ньому позначені:

- 1 – нитка розжарення;
 - 2 – катод;
 - 3 – модулятор (сітка) або керуючий анод;
 - 4 – фокусуєчий анод;
 - 5 – прискорювальний анод;
 - 6 – відхиляючі пластини за вертикаллю й горизонталлю;
 - 7 – екран з люмінофором.
- БЖ – блок живлення;
ПН – подільовач напруги (атенюатор);
ПК – підсилювач сигналів керування променем;
БС – блок синхронізації;
БР – блок розгортки;
П – потенціометр.

Робота осцилографа

Основною частиною електронного осцилографа є електронно-променева трубка, що являє собою скляний балон, з якого відкачане повітря, де розташовані катод, що підігрівається, модулятор, фокусуєчий та прискорювальний аноди, дві пари взаємно перпендикулярних пластин. Внутрішня поверхня дна балона вкрита люмінофором, здатним світитися під дією бомбардування електронами.

Сукупність електродів 2, 3, 4, 5 називають електронною пушкою. Електронна пушка випромінює вузький пучок електронів – електронний промінь, для цього на електроди пушки подають відповідні напруги.

Інтенсивність електронного променя регулюють шляхом зміни напруги на модуляторі, що призводить до зміни яскравості свічення люмінофора. Напруга на першому аноді фокусує потік електронів у вузький пучок, що дозволяє одержати на екрані трубки світлову пляму малого розміру. Для прискорення електронів до швидкості, необхідної для свічення люмінофора, на другий анод подають високу позитивну напругу.

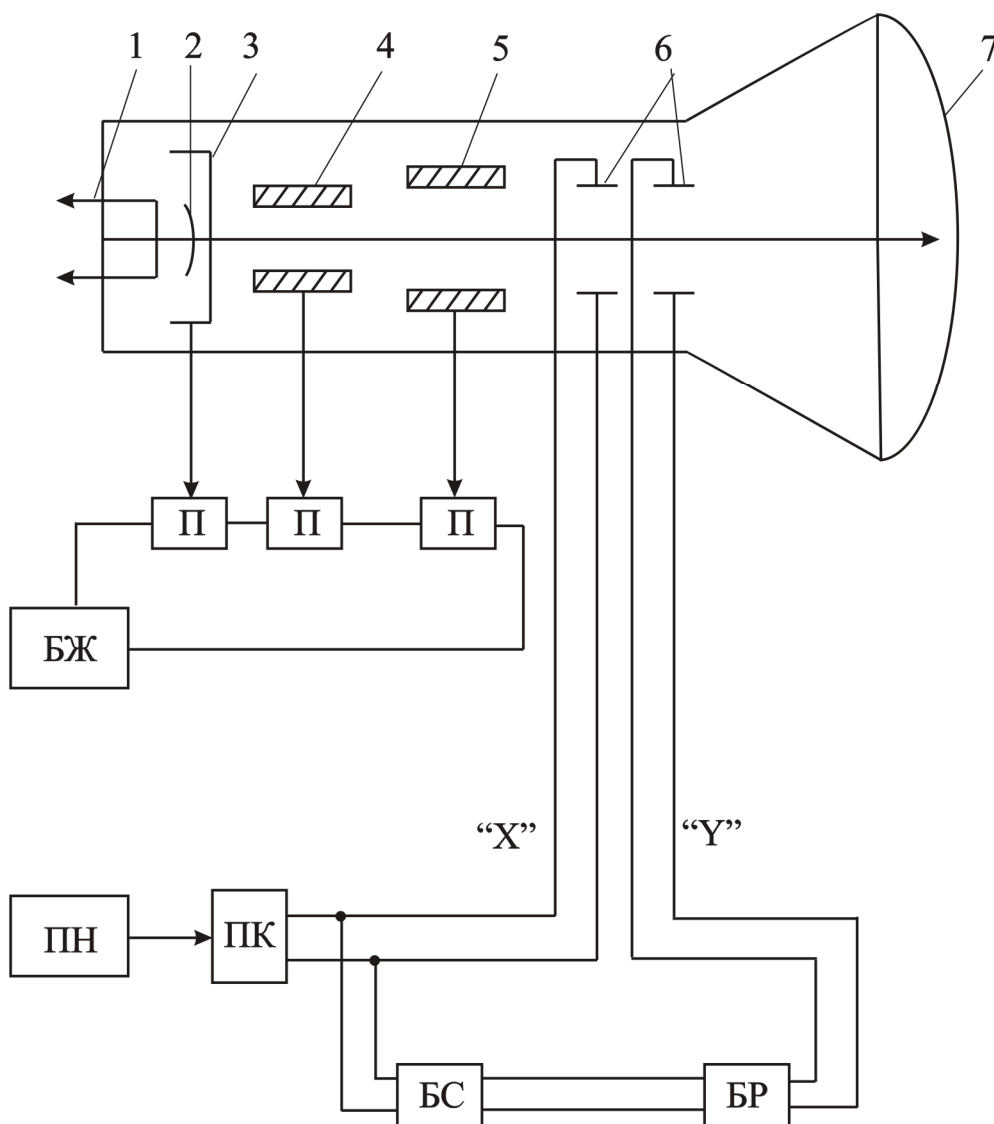


Рис. 5.4 – Спрощена функціональна схема електронного осцилографа

Напруга на модулятор, фокусує і прискорювальні аноди подається від блока живлення (БЖ) через ряд потенціометрів (П).

До горизонтальних відхиляючих пластин осцилографа подаються так звана пилкоподібна напруга, отримана за допомогою блоку розгортки (БР) і блоку синхронізації (БС). За допомогою цих блоків можна змінювати параметри пилкоподібної напруги.

Електронний промінь проходить між парами відхиляючих пластин і під дією напруги, прикладеної до цих пластин, відхиляється, відповідно, за осями координат X і Y , викликаючи зсув світлової плями на екрані трубки.

У сучасних осцилографах використовують також і більш складні, зокрема багатопроменеві, трубки для спостереження відразу двох і більше сигналів. На рис. 5.5 представлений зовнішній вигляд сучасного двоканального електронного аналогового осцилографа С1-157/1. Характеристики осцилографа: смуга пропускання від 0 до 100 МГц; частота дискретизації 50 МГц; розгортка від 1мкс/поділ до 20 з/поділ; режим самописа; цифрова індикація; 5 режимів синхронізації; споживана потужність 80 ВА; похибка установки $\pm 3\%$; вхідний опір 1 МОм.

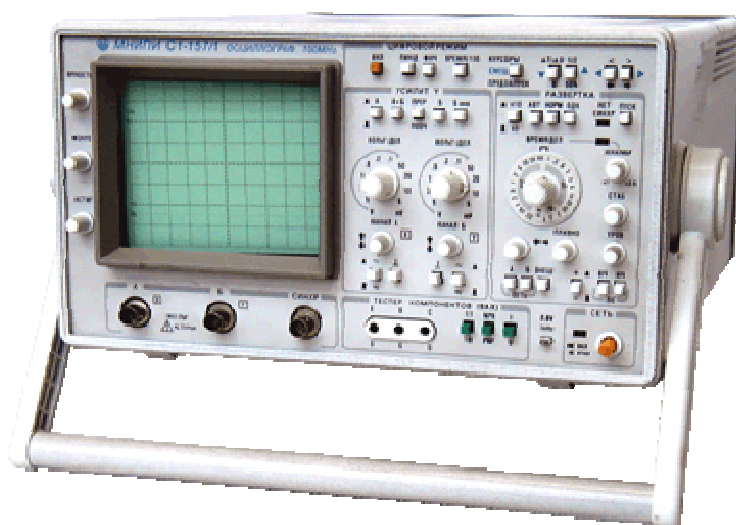


Рис. 5.5 – Зовнішній вигляд електронного аналогового осцилографа С1-157/1

РОЗДІЛ 6. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Цифровий вимірювальний прилад (ЦВП) – це прилад, в якому вхідний сигнал перетворюється в дискретний вихідний сигнал і представляється в цифровому вигляді. Під дискретним сигналом розуміється переривчастий сигнал, в якому інформація міститься не в інтенсивності носія сигналу (наприклад, у значенні напруги, струму), а в числі елементів сигналу (наприклад, у числі імпульсів напруги) та їх взаємному розташуванні в часі і просторі. Систему таких сигналів для подання інформації називають кодом. Вимірювана величина, що подається на вхід ЦВП, є величиною безперервною, тобто на кінцевому інтервалі вона має незліченну безліч значень. Безперервну величину часто називають аналоговою величиною. Процес перетворення аналогової величини в цифрову називається аналогово-цифровим

перетворенням, а перетворювач, що здійснює це перетворення – аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП).

Узагальнена функціональна схема ЦВП представлена на рис. 6.1. Вимірювана величина $x_{вм}$ подається на вхідний пристрій *ВП*, призначений для масштабного перетворення вхідної величини та відділення її від завад. АЦП перетворює величину x в код N , що подається на цифровий відліковий пристрій *ЦВП*, де відображається у вигляді ряду цифр або виводиться на зовнішній пристрій. Як пристрій керування *ПК* в сучасних ЦВП використовуються мікроконтролери.

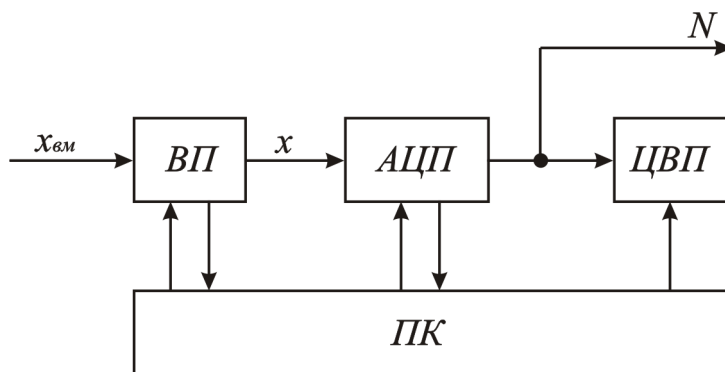


Рис. 6.1 – Узагальнена функціональна схема ЦВП

АЦП широко використовуються для зв'язку первинних перетворювачів електричних і неелектричних величин з мікропроцесорами та іншими пристроями накопичення й обробки результатів спостережень.

За видом вимірюваних величин ЦВП діляться на:

1. Вольтметри постійного та змінного струму.
2. Омметри та мости постійного та змінного струму.
3. Комбіновані прилади.
4. Вимірювачі частоти й інтервалів часу.
5. Спеціалізовані ЦВП, призначені для вимірювань температури, маси вантажів, швидкостей і т.п.

6.1. Цифрові вольтметри постійного та змінного струму

Цифрові вольтметри (ЦВ) постійного струму становлять найпоширенішу групу ЦВП. Вони дозволяють вимірювати напруги від 1 мкВ до 1000 В з похибкою 0,01-0,1% при вхідному опорі 10^9 - 10^7 Ом. Аналогово-цифрові перетворювачі в ЦВ будуються на основі різних методів перетворення, однак найчастіше застосовують методи врівноваженого перетворення і методи інтегрування. АЦП врівноваженого перетворення мають високу швидкодію, високу точність перетворення й низьку перешкодостійкість. АЦП двотактного

інтегрування при порівняно невисокій швидкодії мають високу точність і високу завадостійкість.

Структурна схема ЦВ урівноваженого перетворення показана на рис. 6.2.

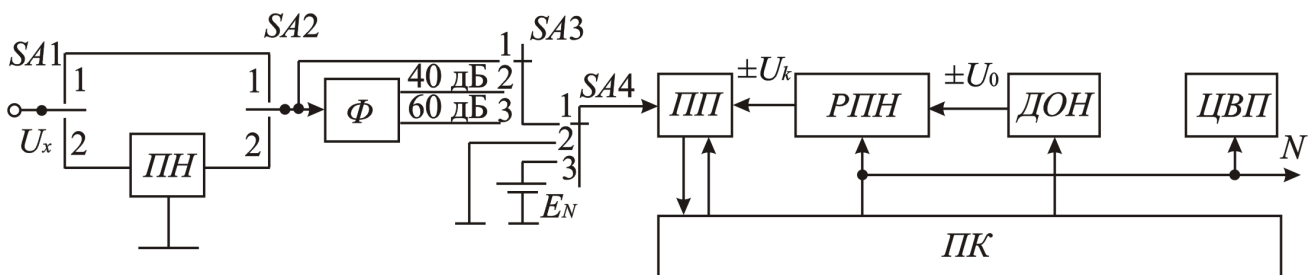


Рис. 6.2 – Структурна схема ЦВ урівноваженого перетворення

Вимірювана напруга U_x безпосередньо (перемикачі $SA1$ і $SA2$ в позиції 1) або через подільувач напруги (ПН) (перемикачі $SA1$ і $SA2$ в позиції 2), за допомогою якого вибирається потрібний діапазон вимірювань, а потім через фільтр (Φ) або безпосередньо, подається на перемикач $SA3$. Фільтр призначений для відділення сигналу від завад промислової частоти 50 Гц і має два виходи із погашенням завади в 40 і 60 дБ відповідно. Фільтр, усуваючи завади, одночасно збільшує інерційність ЦВ, і тим інтенсивніше, чим глибше погашення завади. Тому якщо необхідності у фільтрі немає, його виключають за допомогою переведення $SA3$ в позицію 1.

Подільувач напруги має вхідний опір 10 МОм, цим значенням визначається вхідний опір вольтметра при вимірюванні напруги понад 3 В. Якщо $U_x < 3$, то подільувач напруги вимикається і U_x подається через $SA3$ і $SA4$ безпосередньо на вхід порівнюючого пристрою (ПП), що має більше значення вхідного опору (10^9 - 10^{10} Ом). На другий вхід ПП подається напруга, що компенсує U_K , що знімається з виходу регульованого подільувача напруги (РПН). Максимальний діапазон $U_K=0$ -3 В, це пояснюється вимогою $U_x < 3$. Регульований подільувач напруги являє собою коло резисторів, які перемикаються транзисторним перемикачем, при цьому коефіцієнт передачі подільувача K_D прямо пропорційний коду N , що подається на перемикач РПН

$$K_D = a \cdot N, \quad (6.1)$$

де a – коефіцієнт пропорційності.

Напруга на вхід РПН $\pm U_0$ надходить від джерела опорної напруги (ДОН). Очевидно, що $U_K = U_D \cdot U_0$. Пристрій керування (ПК) автоматично встановлює в схемі рівновагу $U_x = U_K = U_D \cdot U_0 = a \cdot U_0 \cdot N$, звідки

$$N = \frac{U_x}{a \cdot U_0}, \quad (6.2)$$

тобто залежність між кодом і вимірюваною напругою прямо пропорційна. Потім код N подається на цифровий відліковий пристрій ЦВП, де у вигляді цифр відображається значення вимірюваної напруги. Перемикач SA4 має положення 2 і 3 для корекції адитивної і мультиплікативної складової похибки ЦВ.

Цифрові вольтметри мають низький поріг реагування (зазвичай 10 або 1 мкВ), тому важливо, щоб результат вимірювань мало залежав від похибки наведень у вхідному колі ЦВ, рівень яких часто вищий за рівень реагування вольтметра. У ЦВП розрізняють завади нормального вигляду й завади загального вигляду. Завади нормального вигляду виникають за рахунок дії зовнішніх змінних електромагнітних полів. Для зниження цих завад площу провідного контуру прагнуть зробити мінімальною і підключати джерело живлення до ЦВ коаксіальним кабелем або двома звитими провідниками. Завади загального вигляду виникають через розходження потенціалів точок заземлення джерела і ЦВП. Завада може містити постійну і змінну складові. Захист від завад загального вигляду здійснюється шляхом ретельно продуманого і добре виконаного монтажу ЦВП, а також екрануванням вхідного кола ЦВ. Внутрішній екран ретельно ізолюють від корпусу ЦВ. Внутрішній екран спеціальним третім провідником підключається до заземленої точки джерела сигналу.

Боротьба із завадами нормального вигляду промислової частоти 50 Гц в ЦВ врівноваженого перетворення ведеться за допомогою фільтрів у вхідному колі. Як фільтри використовуються подвійні Т-образні мости.

Ступінь погашення завади K_n прийнято характеризувати відношенням значення завади до її погашення e_n до значення завади після її погашення e_n^* і виражати це значення в децибелах

$$K_n = 20 \cdot \lg \frac{e_n}{e_n^*}. \quad (6.3)$$

Переваги ЦВ

- 1) Висока точність вимірювань.
- 2) Широкі межі вимірювань.
- 3) Значна швидкодія.
- 4) Можливість обробки результату вимірювань за допомогою комп'ютера.

До *недоліків* ЦВ можна віднести складність схеми і конструкції.

Сучасна промисловість випускає ряд типів ЦВ: щитові постійного струму (ОММ 37D) з діапазоном вимірювань від 200мВ до 200В, точністю 0,1%; щитові

змінного струму (ОМ 47АС); універсальні ЦВ (В7-77 (рис. 6.3)) з діапазоном вимірювань 10мкВ-1000В, похибкою вимірювань $\pm 0,05\%$ для постійного струму, з діапазоном вимірювань 1мВ-750В, похибкою вимірювань $\pm 0,05\%$ для змінного струму.



Рис. 6.3 – Зовнішній вигляд цифрового вольтметра В7-77

6.2. Цифрові осцилографи

Можна виділити наступні переваги цифрового осцилографа в порівнянні з електронно-променевим:

- висока точність вимірювань;
- яскравий добре сфокусований екран на будь-якій швидкості розгортки;
- можливість відображення сигналу до моменту запуску;
- можливість зупинки оновлення екрана на довільний час;
- можливість детектування імпульсних завад;
- автоматичні засоби вимірювань параметрів сигналів;
- можливість підключення принтера для створення звітів вимірювань;
- можливість статистичної обробки сигналу;
- засоби самодіагностики й самокалібрування;
- різко обкреслені контури зображення сигналу;
- можливість детального дослідження перехідних процесів;
- зчитування попередньо записаних даних;
- широкі аналітичні можливості й спрощена архівація;
- можливість порівняння попередньо записаних даних з поточними.

Цифрові осцилографи випускаються або у вигляді самостійних приладів, або у вигляді приставки до персонального комп'ютера (ПК). Пристрої на основі ПК відносяться до нового напрямку у вимірювальній техніці – віртуальні прилади. Тепер фахівцеві достатньо підключити до комп'ютера додатковий пристрій – модуль цифрового осцилографа для того, щоб почати вимірювання і аналіз фізичної величини. При цьому програмна частина віртуального приладу емулює передню керуючу панель стаціонарного вимірювального пристрою. Комп'ютерною мишкою та клавіатурою здійснюється керування приладом за допомогою спеціальних програм, обробка інформації, що надійшла, а також її зберігання на накопичувачі (жорсткому диску).

Тими ж можливостями володіють осцилографи з рідкокристалічним дисплеєм (РКД). Всі можливості, пов'язані з автоматизацією вимірювань, вбудовані в цифровий осцилограф.

У наш час на ринку вимірювальної техніки присутня безліч виробників цифрових запам'ятовувачих осцилографів (ЦЗО). Найбільш відомі виробники: «АКТАКОМ», «Tektronix», «Hitachi-Denshi», «Agilent Technologies», «LeCroy», «GaGe Applied Technologies», Good Will instrument Co. Ltd, фірма «Chauvin Arnoux», корпорація «Fluke».

На рис. 6.4 зображений зовнішній вигляд двоканального цифрового осцилографа ATTEN ADS1022C.



Рис. 6.4 – Зовнішній вигляд цифрового осцилографа ATTEN ADS1022C

Характеристики осцилографа: смуга пропускання 25 МГц; частота дискретизації 500 Мбит/с; довжина внутрішньої пам'яті до 4 К. 32 вбудовані автоматичні функції вимірювань, включаючи такі як вимірювання тимчасових

затримок між сигналами, фази між двома сигналами й інші вимірювання між фронтами сигналу, дають користувачеві розширені можливості зрозуміти та проаналізувати форми вхідних сигналів. Додаткові можливості – функція контролю допуску, цифрові фільтри, що програмуються користувачем, сегментована розгортка – спрощують і скорочують час налагодження різних радіотехнічних пристроїв. Є вбудований USB-хост для підключення зовнішніх запам'ятовувачих пристроїв.

РОЗДІЛ 7. ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРЯМИМИ МЕТОДАМИ

До параметрів кола відносяться:

- 1) Активний опір R .
- 2) Ємність C , кут діелектричних втрат $tg\delta$.
- 3) Індуктивність L , добротність котушки Q .

Параметри кола R , L , C не залежать від частоти, інші параметри – функції частоти.

Вимірювання параметрів може бути виконане різними методами і приладами. Вибір того або іншого з них визначається конкретними умовами завдання – очікуваним значенням вимірюваної величини, необхідною точністю, наявною в розпорядженні апаратурою.

Для точних вимірювань (з похибкою 1-1,5%), використовують мости, потенціометри та цифрові прилади. Для більш грубих вимірювань використовують електромеханічні прилади. При цьому використовують або прилади, градуйовані в одиницях вимірюваної величини (омметри, фарадметри), або декілька приладів, за показниками яких можна розрахувати вимірювану величину (непрямі методи вимірювань).

7.1. Прямі методи вимірювань активних опорів

За величиною опори діляться на 3 групи:

- 1) Малі опори (≤ 1 Ом).
- 2) Середні (від 1 Ом до 0,1 МОм).
- 3) Великі (від 0,1 МОм і більше).

Активні опори твердих провідників, звичайно, вимірюють на постійному струмі, а опори провідників, що мають велику вологість (рідини, заземлення), – на змінному.

7.1.1. Мостом постійного струму

Для вимірювань середніх опорів до 1 МОм дуже часто використовують одинарні мости постійного струму (рис. 7.1). Перш ніж вибрати вимірювальний міст і режим його роботи, встановлюють приблизне значення вимірюваного опору. На заводській табличці та на передній панелі вимірювального мосту зазвичай зазначені схема й рекомендації до вибору доцільного режиму залежно від діапазону вимірюваного опору.

Одинарний міст постійного струму складається із трьох зразкових резисторів R_1 , R_2 , R_3 (зазвичай регульованих), які включають із вимірюваним опором R_x у мостову схему, тобто в плечі мосту (рис.7.1). До однієї з діагоналей цієї схеми подають живлення від джерела ЕРС E . А в іншу діагональ через вимикач $SA1$ і обмежуючий опір R_0 включають високочутливий гальванометр Γ .

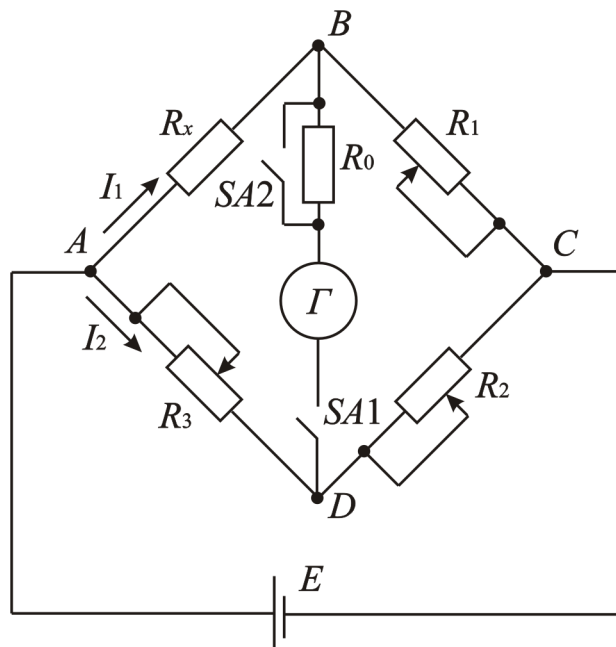


Рис. 7.1 – Схема одинарного мосту постійного струму

Схема працює в такий спосіб. При подачі напруги через резистори R_x , R_1 , R_2 , R_3 проходять струми I_1 і I_2 . Ці струми викликають у резисторах падіння напруг U_{AB} , U_{BC} , U_{AD} і U_{DC} . Якщо ці падіння напруги будуть різними, то потенціали точок φ_A , φ_B , φ_C і φ_D будуть неоднакові. Тому якщо вимикачем $SA1$ підключити гальванометр, то через нього буде проходити струм $I_\Gamma = \frac{\varphi_B - \varphi_D}{R_0}$.

Завдання вимірювань полягає в тому, щоб врівноважити міст, тобто зробити потенціали точок φ_B і φ_D однаковими, інакше кажучи, зменшити струм гальванометра до нуля. Для цього починають змінювати опори резисторів R_1 , R_2 , R_3 доти, доки струм гальванометра не буде дорівнювати нулю. При $I_\Gamma = 0$ $\varphi_B = \varphi_D$, а напруги $U_{AB} = U_{AD}$ і $U_{BC} = U_{DC}$. Виразивши ці напруги через

струми та опори $U_{AD} = I_2 \cdot R_3$, $U_{BC} = I_1 \cdot R_1$, $U_{DC} = I_2 \cdot R_2$, $U_{AD} = I_1 \cdot R_x$, одержимо дві рівності:

$$\begin{aligned} I_1 \cdot R_x &= I_2 \cdot R_3 \\ I_1 \cdot R_1 &= I_2 \cdot R_2 \end{aligned} \quad (7.1)$$

Розділивши першу рівність на другу, одержимо

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot R_3. \quad (7.2)$$

Ця рівність називається умовою балансування одинарного мосту, або умовою рівноваги мосту. З неї випливає, що міст стабілізується тоді, коли добутки опорів протилежних плечей будуть однаковими. Звідси вимірюваний опір визначається за формулою

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}. \quad (7.3)$$

У реальних одинарних мостах змінюють або опір резистора R_1 (його називають плечем порівняння), або відношення опорів R_3/R_2 . Найбільше поширення набули мости, в яких плавно змінюється опір R_1 , і стрибками, звичайно, кратними 10, змінюється відношення R_3/R_2 , наприклад, у мостах P333 або DY-B23A (рис. 7.2).



Рис. 7.2 – Зовнішній вигляд одинарного вимірювального мосту постійного струму DY-B23A

Кожний міст характеризується межею вимірювань опорів від R_{\min} до R_{\max} . Важливим параметром мосту є його чутливість

$$S_M = S_G \cdot S_{cx}, \quad (7.4)$$

де $S_G = \Delta\alpha / \Delta I_G$ – чутливість гальванометра; $S_{cx} = \Delta I_G / \Delta R$ – чутливість схеми; $\Delta\alpha$ – кут відхилення стрілки гальванометра.

Підставляючи S_{Γ} , S_{cx} в S_M , одержимо

$$S_M = \frac{\Delta\alpha}{\Delta R}. \quad (7.5)$$

Іноді користуються поняттям відносної чутливості мосту

$$S_M = \frac{\Delta\alpha}{(\Delta R/R)} = \frac{\Delta\alpha}{\zeta}, \quad (7.6)$$

де ζ – відносна зміна опору у вимірюваному плечі.

Залежно від конструктивного оформлення розрізняють магазинні й лінійні (реохордні) мости. У магазинному мості опори плечей виконані у вигляді штепсельних або важільних багатозначних мір електричних опорів (магазинів опорів), в реохордних мостах плече порівнянь роблять у вигляді магазину опорів, а плечі відхилення – у вигляді резистора, який ділиться повзунком на дві регульовані частини.

За припустимою похибкою одинарні вимірювальні мости постійного струму мають класи точності: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 1,0; 5,0. Похибка одинарного мосту постійного струму залежить від ступеня сумірності опорів сполучаючих проводів і контактів з вимірюваним опором. Чим менший вимірюваний опір, тим більша похибка. Тому для вимірювань малих опорів застосовують подвійні мости (шестиплічні) постійного струму (рис. 7.3).

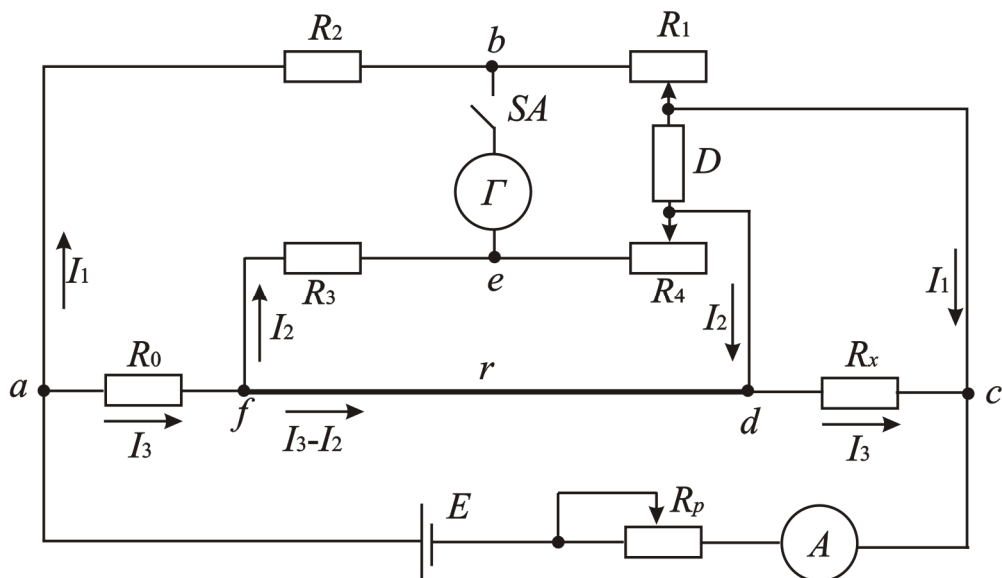


Рис. 7.3 – Схема подвійного мосту постійного струму

Плечима подвійного мосту постійного струму служать вимірюваний опір R_x (що виконують з чотирма затискачами для зменшення впливу перехідних контактних опорів), зразковий резистор R_0 і дві пари допоміжних резисторів R_1 , R_2 і R_3 , R_4 .

Рівновага мосту визначається за формулою:

$$R_x = R_0 \cdot \frac{R_1}{R_2} - \frac{r \cdot R_3}{r + R_3 + R_4} \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right), \quad (7.7)$$

де r – опір спеціального каліброваного резистора.

Із формули (7.7) видно, що якщо обидва відношення плечей рівні між собою, то від'ємник дорівнює нулю. Незважаючи на те, що опори R_1 і R_4 , переміщуючи повзунок D , встановлюють однаковими, через розкид параметрів опорів R_2 і R_3 цього домогтися дуже складно. Для зменшення помилки вимірювань треба опір перемички, що з'єднує зразковий резистор R_0 і вимірюваний опір R_x , брати якнайменшим. Зазвичай до приладу додається спеціальний калібрований резистор r . Тоді від'ємник у співвідношенні (7.7) практично дорівнює нулю. Значення вимірюваного опору можна визначити з формули:

$$R_x = R_0 \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (7.8)$$

Подвійні мости розраховані на роботу тільки зі змінним відношенням плечей. Чутливість подвійного мосту залежить від чутливості нульового показника, параметрів мостової схеми і значення робочого струму. Зі збільшенням робочого струму чутливість збільшується.

Найбільшого поширення набули комбіновані мости постійного струму, розраховані на роботу за схемами одинарного й подвійного мосту.

На рис. 7.4 представлений зовнішній вигляд подвійного вимірювального мосту постійного струму DY-B44. Міст розрахований на вимірювання опорів від 0,01 Ом до 110 МОм. Похибка вимірювань залежно від межі становить від 0,2 до 1,0%. Є можливість розширення меж вимірювань від 0,5 мкОм.



Рис. 7.4 – Зовнішній вигляд подвійного вимірювального мосту постійного струму DY-B44

7.1.2. Омметром

Омметр – це прилад магнітоелектричної системи, послідовно або паралельно з яким включається вимірюваний опір.

Зазвичай прилади, призначені для вимірювань опорів до 100 Ом, мають паралельну схему включення і пряму шкалу (рис. 7.5, б). Прилади для вимірювань опорів порядку декількох тисяч Ом виконуються за послідовною схемою й мають зворотну шкалу (рис. 7.5, а).

Послідовне включення омметра з вимірюваним опором R_x (для $R_x > 100$ Ом)

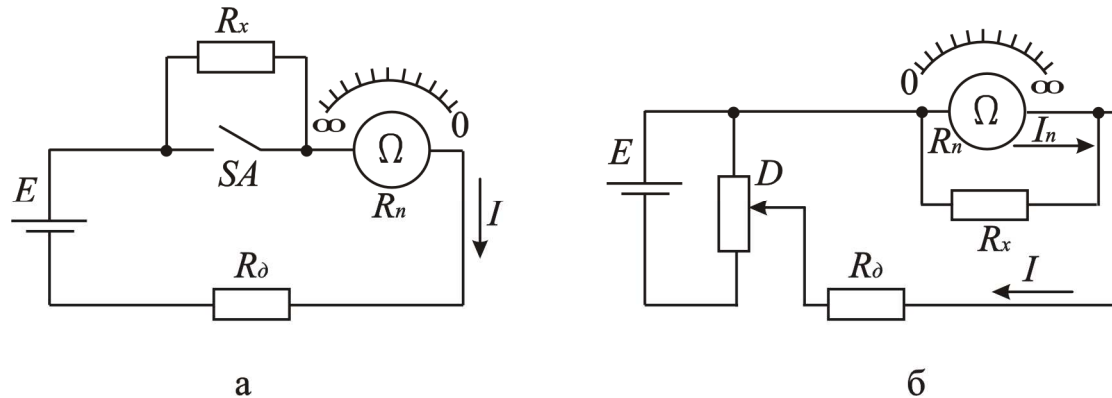


Рис. 7.5 – Схеми включення омметра

а – послідовне включення (при вимірюванні опорів більше 100 Ом;)

б – паралельне включення (при вимірюванні опорів до 100 Ом)

Струм, що протікає через прилад (рис. 7.5, а):

$$I = \frac{E}{R_x + R_d + R_n}, \quad (7.9)$$

де E – ЕРС джерела живлення; R_d – опір, що обмежує силу струму; R_n – внутрішній опір приладу.

Оскільки R_d і R_n постійні, то значення струму в колі буде залежати від вимірюваного опору R_x , отже, шкалу приладу можна відградуювати в одиницях вимірюваного опору.

Рівняння шкали при послідовному включенні:

$$\alpha = \frac{E}{(R_x + R_d + R_n) \cdot C_I} = F(R_x), \quad (7.10)$$

де C_I – ціна розподілу приладу за струмом.

Працюють омметри в такий спосіб. Перед вимірюванням натискають кнопку SA (рис. 7.5, а), що шунтує вимірюваний опір, і за допомогою магнітного шунта встановлюють стрілку на контрольну позначку. Відпускаючи кнопку,

включають в коло вимірюваний опір R_x . Стрілка приладу покаже значення вимірюваного опору.

Особливість омметра з послідовною рамкою в тому, що в цьому приладі зворотна шкала, тобто нульова позначка знаходиться праворуч від шкали, а позначка максимального значення опору – ліворуч. Це пояснюється тим, що при вимірюванні великих опорів через рамку приладу протікає незначний струм.

Паралельне включення омметра з вимірюваним опором R_x (для $R_x < 100 \text{ Ом}$)

Струм, що протікає через зовнішнє (щодо вимірювального механізму) коло (рис. 7.5, б):

$$I = \frac{E}{R_\partial + \frac{R_n \cdot R_x}{R_n + R_x}} \quad (7.11)$$

Струм, що протікає через прилад:

$$I_n = I \cdot \frac{R_x}{R_p + R_x} = \frac{E}{\frac{R_\partial(R_n + R_x)}{R_x} + \frac{R_n \cdot R_x}{R_x}} = \frac{E}{\frac{R_\partial \cdot R_n}{R_x} + R_\partial + R_n} \quad (7.12)$$

Рівняння шкали при паралельному включенні:

$$\alpha = \frac{E \cdot C_I}{\frac{R_\partial \cdot R_n}{R_x} + R_\partial + R_n} = f(R_x) \quad (7.13)$$

Звичайно, омметри виготовляються у вигляді переносних приладів порівняно невеликої точності (класів 1,5 або 2,5) і як джерела живлення мають суху батарею. Із часом напруга батареї падає, тому підтримується постійним добуток $B \cdot U = \text{const}$. Для цього в магнітну систему приладу вбудовується магнітний шунт – феромагнітна пластина, яка замикає полюси так, що частина магнітного потоку проходить через корисний повітряний проміжок, а частина – через магнітний шунт. Регулювання положення феромагнітної пластини відносно полюсних наконечників шунта здійснюється за допомогою регулюючого гвинта, що розташований на корпусі приладу.

На рис. 7.6 представлений зовнішній вигляд омметра М419. Прилад призначений для вимірювань опорів від 0 до 5 МОм. Клас точності приладу 2,5. Працює на частотах від 45 до 500 Гц. Споживана потужність не більше 1 Вт. Вхідний опір 250 кОм.



Рис. 7.6 – Зовнішній вигляд омметра М419.

Сучасна промисловість випускає цілу низку цифрових омметрів підвищеної точності з широким діапазоном вимірювань. На рис. 7.7. показаний зовнішній вигляд цифрового міліомметра GOM-802. Діапазон вимірюваних опорів цього приладу від 1 мкОм до 3 МОм. Похибка вимірювань не вище $\pm 0,1\%$.



Рис. 7.7 – Зовнішній вигляд цифрового міліомметра GOM-802

7.1.3. Мегомметром

Мегомметр призначений для вимірювань великих опорів (кіло- та мега-Ом) і являє собою магнітоелектричний логометр. У ньому є джерело живлення – генератор постійного струму з паралельним збудженням і ручним приводом.

Кут відхилення стрілки приладу залежить від відношення струмів, що протікають через рамки, і практично не залежить від поданої напруги.

Послідовно з однією із рамок включається зразковий опір, а послідовно з іншою – вимірюваний опір. Рівняння шкали мегомметра:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right), \quad (7.14)$$

де I_1, I_2 – струми відповідно першої й другої рамок.

Шкала мегомметра охоплює діапазон вимірювань від 0 до ∞ . Перехід від вимірювань кОм до МОм здійснюється за допомогою перемикача на два положення. Перевірку справності приладу здійснюють перед вимірюваннями до включення в коло: при обертанні ручки генератора стрілка повинна бути встановлена на «0» – при перемикачі в положенні «кОм», і на ∞ – в положенні «МОм».

Перед вимірюванням опору необхідно переконатися, що електричні кола не перебувають під напругою.

Переваги

- 1) Простота у виготовленні.
- 2) Зручні в користуванні.

До *недоліків* можна віднести невисоку точність вимірювань.

Промисловість випускає мегомметри з номінальними напругами 100, 500 і 1000 В і межами вимірювань опору ізоляції від 0 до 1000 МОм типів М1101М, М1102/1, М503М, МС-0,5 і ін. На рис. 7.8 показаний зовнішній вигляд мегомметра ЭС 0210, розрахованого на вимірювання опорів від 0,5 до 100000 МОм.



Рис. 7.8 – Зовнішній вигляд мегомметра ЭС 0210

7.2. Вимірювання ємності та індуктивності прямими методами

7.2.1. Мостом змінного струму

Мостом змінного струму можна виміряти: індуктивність, ємність, добротність і кут діелектричних втрат $tg\delta$.

Міст змінного струму збирають із трьох змінних комплексів опорів $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ і вимірюваного опору \underline{Z}_x (рис. 7.9). Міст живиться від джерела змінного струму промислової частоти або всередині приладу встановлюють генератор змінного струму з частотою 1-10 кГц. У вимірювальну діагональ можна включити вібраційний гальванометр, електронний прилад, магнітоелектричний гальванометр, призначений для роботи в колі змінного струму.

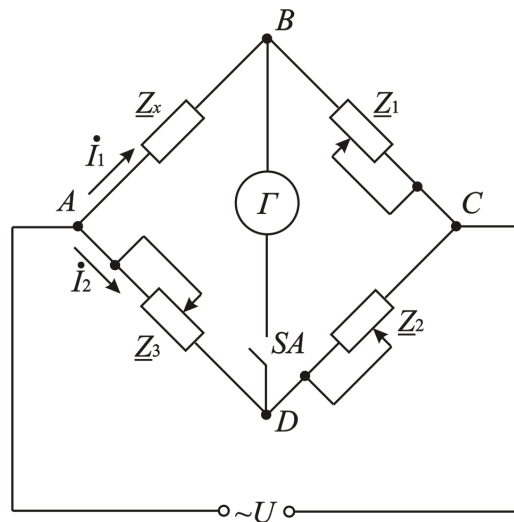


Рис. 7.9 – Схема вимірювального мосту змінного струму

Умова рівноваги мосту в комплексній формі:

$$\underline{Z}_x \cdot \underline{Z}_2 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3. \quad (7.15)$$

Два комплексних числа рівні, коли в них рівні модулі й аргументи. Дві умови рівноваги мосту змінного струму:

$$\begin{cases} Z_x \cdot Z_2 = Z_1 \cdot Z_3 \\ \varphi_x \cdot \varphi_2 = \varphi_1 \cdot \varphi_3 \end{cases}. \quad (7.16)$$

Зазвичай в мостах змінного струму в якості Z_1 і Z_2 використовують активні опори R_1 і R_2 , тому друга умова рівноваги мосту зводиться до рівності:

$$\varphi_x = \varphi_3. \quad (7.17)$$

Таким чином, характер комплексного опору в третьому плечі буде визначатися характером вимірюваного опору.

$$\text{Добротність котушки: } Q = \frac{X_K}{R_K} = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \frac{\omega \cdot L_3}{R_3}.$$

$$\text{Кут діелектричних втрат: } tg\delta = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot C_3 \cdot R_3.$$

Міст змінного струму Р577 відноситься до універсальних, тому що дозволяє вимірювати ємність, індуктивність, $tg\delta$, Q і R . Похибка вимірювань $\pm 1,0\%$. Робоча частота 1000 Гц. Межі вимірювань ємності від 1 пФ до 1100 мкФ, індуктивності від 1 мкГ до 110 Гн, опору від 0,1 Ом до 11 МОм на постійному струмі й від 1 Ом до 10 кОм на змінному. Живлення 220 В, частота 50 Гц. На рис. 7.10 показаний зовнішній вигляд високовольтного вимірювального мосту змінного струму СА7100-2. Міст призначений для вимірювань електричної ємності і тангенса кута діелектричних втрат, напруги і частоти змінного струму, опору постійному струму.



Рис. 7.10 – Зовнішній вигляд високовольтного вимірювального мосту постійного струму

7.2.2. Вимірювання ємності фарадметром

Фарадметр – логометр електродинамічної системи. Нерухому котушку логометра з'єднують послідовно з конденсатором постійної ємності C і підключають до напруги живлення U мережі змінного струму (рис. 7.11). Послідовно з однією з рухомих котушок включена зразкова ємність C_0 , а послідовно з іншою – вимірювана ємність C_x . Опори котушок роблять настільки малими в порівнянні з опором конденсаторів, що струми в котушках будуть залежати тільки від ємності, тоді $I_1 = U \cdot \omega \cdot C_x$, $I_2 = U \cdot \omega \cdot C_0$, де ω – кутова частота. Оскільки струми збігаються за фазами, то рівняння шкали має вигляд:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{C_x}{C_0}\right). \quad (7.18)$$

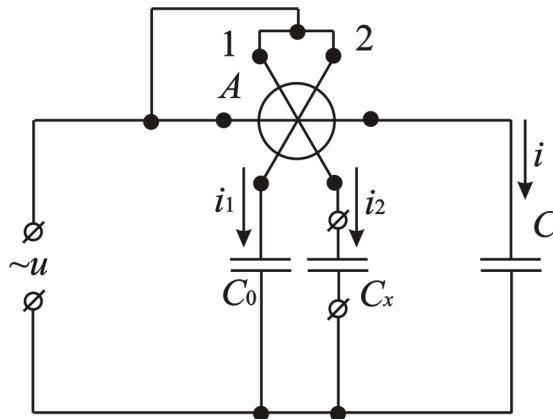


Рис. 7.11 – Схема підключення фарадметра

Кожному значенню ємності C_x при постійній зразковій ємності відповідає певний кут відхилення стрілки логометра. Тобто шкалу логометра можна відградуювати в одиницях ємності.

Недоліки

- 1) Похибка вимірювань становить 2-4%.
- 2) Обмежений діапазон вимірювань.
- 3) Залежність показників вимірювань від частоти.

Промисловість випускає декілька фарадметрів для вимірювань ємності, наприклад, Д524М, Д595. На рис. 7.12 показаний зовнішній вигляд ручного електронного фарадметра DM-9023. Межа вимірювань приладу від 200 пФ до 20000 мкФ. Похибка вимірювань не більше $\pm 2\%$. Джерело живлення – батарея 9 В.



Рис. 7.12 – Зовнішній вигляд ручного фарадметра DM-9023

7.2.3. Вимірювання ємності балістичним гальванометром і вольтметром

Метод заснований на вимірюванні балістичним гальванометром заряду Q , що накопичується конденсатором C_x при включенні його на вимірювану напругу U . Схема вимірювання ємності показана на рис. 7.13.

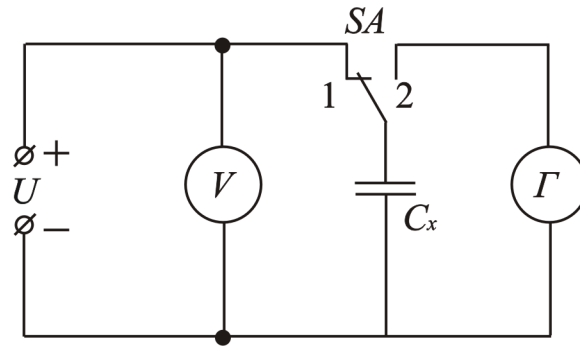


Рис. 7.13 – Схема вимірювання ємності балістичним гальванометром і вольтметром

Спочатку перемикач SA встановлюють в положення 1, заряджають конденсатор до напруги U , яку вимірює вольтметром V з великим внутрішнім опором. Потім перемикач встановлюють у положення 2, конденсатор розряджається через балістичний гальванометр, і показчик гальванометра починає відхилятися до якогось максимального значення α_{\max} . Знаючи балістичну постійну гальванометра C_{δ} із його паспорта, можна визначити вимірювану ємність:

$$C_x = \frac{Q}{U} = \frac{C_{\delta} \cdot \alpha_{\max}}{U}, \quad (7.19)$$

де C_{δ} – балістична постійна гальванометра; α_{\max} – максимальне відхилення показчика гальванометра; U – напруга, вимірювана вольтметром.

РОЗДІЛ 8. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ В КОЛАХ ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО СТРУМУ

Вимірювання потужності в колах постійного струму, а також активної й реактивної потужності в колах змінного струму – однофазних і трифазних, трипровідних і чотирипровідних – здійснюється в абсолютній більшості випадків електродинамічними та феродинамічними ватметрами. У лабораторній практиці застосовуються електродинамічні ватметри класів точності 0,1; 0,2; 0,3 і 0,5. У промисловості при технічних вимірюваннях широко застосовуються феродинамічні ватметри класів точності 1,0; 1,5 і 2,5.

Електродинамічні ватметри використовують для вимірювань потужності в колах постійного струму і колах змінного струму частотою до декількох тисяч герців.

Феродинамічні ватметри використовують при вимірюваннях потужності в колах змінного струму, головним чином, промислової частоти.

8.1. Вимірювання потужності в колах постійного струму

Потужність споживача, включеного в коло постійного струму, залежить від напруги U на його затискачах і струму I . Значення потужності можна визначити за формулою

$$P = U \cdot I = I \cdot R^2 = \frac{U^2}{R} = U^2 \cdot G, \quad (8.1)$$

де R – опір навантаження; G – провідність навантаження.

Із (8.1) зрозуміло, що потужність в колі постійного струму можна виміряти декількома непрямими методами.

Один із таких методів одержав широке застосування – метод вимірювань потужності в колі постійного струму магнітоелектричними амперметром і вольтметром. При використанні цього методу необхідно враховувати опір навантаження і залежно від цього вибирати схему включення приладів.

Якщо навантаження має великий опір, то вольтметр потрібно включати до амперметра (рис. 8.1, а). У цьому випадку, виконавши множення показників приладів, одержуємо:

$$P = U \cdot I = (U_A + U_R) \cdot I = U_A \cdot I + U_R \cdot I = \Delta P_A + P_H, \quad (8.2)$$

де U_A – падіння напруги в амперметрі; U_R – падіння напруги в навантаженні; ΔP_A – потужність, що розсіюється в амперметрі; P_H – потужність навантаження.

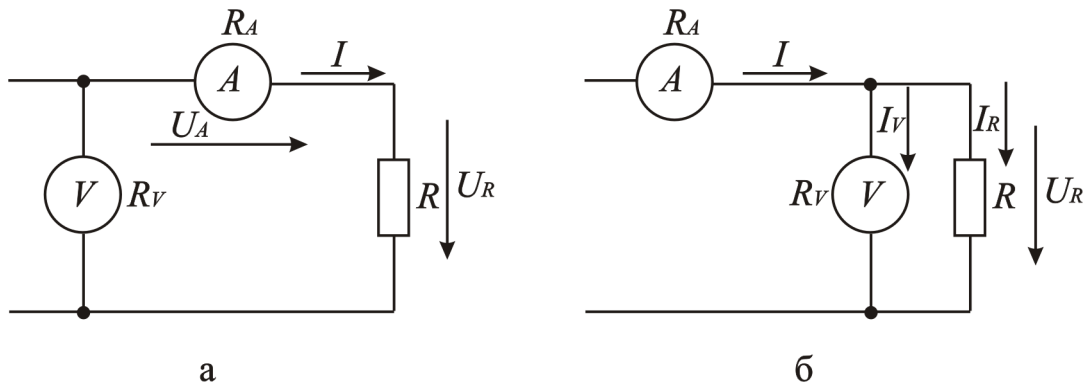


Рис. 8.1 – Схеми включення амперметра і вольтметра при вимірюванні потужності

а – якщо навантаження має великий опір;

б – якщо навантаження має невеликий опір

Із формули (8.2) зрозуміло, що вимірюване значення потужності P виявляється більше дійсної потужності навантаження P_H на величину ΔP_A , отже, відносна похибка вимірювань

$$\delta = \frac{\Delta P_A}{P} \cdot 100 = \frac{R_A}{R} \cdot 100, \quad (8.3)$$

де R_A – опір амперметра.

Із (8.3) видно, що чим більший опір навантаження R і чим менший опір амперметра R_A , тим з більшою точністю можна виміряти потужність.

Якщо навантаження має незначний опір, то вольтметр варто включати після амперметра (рис. 8.1, б). Добуток показників приладів

$$P = U \cdot I = U_R \cdot (I_V + I_R) = U_R \cdot I_V + U_R \cdot I_R = \Delta P_V + P_H, \quad (8.4)$$

де I_V – струм, що протікає в колі вольтметра; I_R – струм навантаження; ΔP_V – потужність, споживана вольтметром.

У цьому випадку вимірюване значення потужності більше дійсної потужності навантаження на величину ΔP_V , тобто похибку в результат вимірювань вносить вольтметр:

$$\delta = \frac{\Delta P_V}{P} \cdot 100 = \frac{R}{R_V} \cdot 100, \quad (8.5)$$

де R_V – опір вольтметра.

Із (8.5) зрозуміло, що чим менший опір споживача R і чим більший опір вольтметра R_V , тим з більшою точністю можна виміряти потужність.

Найбільш просте й точне вимірювання потужності здійснюється за допомогою одноелементного електродинамічного ватметра. Включення такого ватметра в коло постійного струму необхідно здійснювати з дотриманням правильного з'єднання генераторних затискачів обмотки кола струму й напруги. На рис. 8.2 показано включення ватметра PW для вимірювань потужності P .

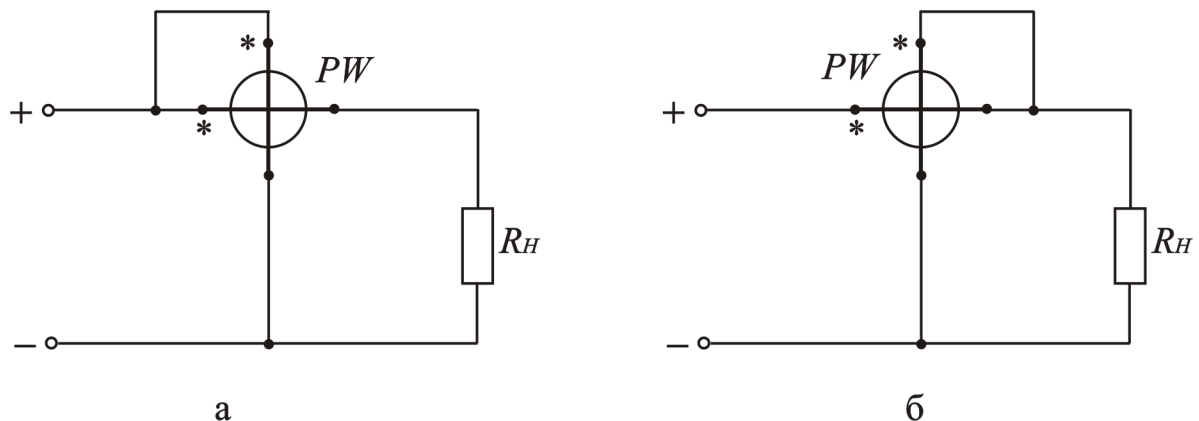


Рис. 8.2 – Включення ватметра для вимірювань потужності

а – якщо навантаження має великий опір;

б – якщо навантаження має невеликий опір

Генераторні затискачі струмової обмотки ватметра завжди включаються в напрямку джерела живлення. Генераторний затискач обмотки напруги з метою

зменшення методичної похибки, може бути включений так, як це показано на рис. 8.2,а або рис. 8.2, б. Схема рис. 8.2,а використовується при досить великому опорі навантаження R_H , а схема за рис. 8.2, б – при відносно малому значенні опору навантаження.

У більшості випадків застосування ватметрів опір навантаження R_H відносно великий, а, отже, ватметр необхідно включати за схемою рис. 8.2, а.

Для того щоб визначити потужність за показниками приладу, потрібно показники приладу в позначках n помножити на ціну розподілу C_P :

$$P = n \cdot C_P = n \cdot \frac{U_H \cdot I_H}{N}, \quad (8.6)$$

де U_H, I_H – відповідно номінальне значення напруги й струму обмоток ватметра; N – кількість позначок у шкалі приладу.

Лабораторні ватметри випускаються зазвичай багатомежними. На циферблаті таких приладів наводиться таблиця зі значеннями ціни розподілу для всіх можливих меж вимірювань.

Якщо напруга в мережі більша допустимої напруги паралельної котушки, а струм більший допустимого струму струмової котушки, то для підключення приладу необхідно в колі постійного струму скористатися додатковим резистором і шунтом.

8.2. Вимірювання потужності в колах змінного струму

8.2.1. Вимірювання активної потужності в однофазному колі змінного струму

Значення активної потужності в однофазному колі змінного струму визначають за формулою

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (8.7)$$

де U – напруга навантаження; I – струм навантаження; φ – фазовий зсув між напругою й струмом.

З формули зрозуміло, що потужність навантаження можна визначити непрямим методом, якщо включити три прилади: вольтметр, амперметр і фазометр. Однак у цьому випадку не можна розраховувати на значну точність вимірювань. Тому для вимірювань активної потужності в колах змінного струму використовують ватметри електродинамічної системи. У випадку грубих вимірювань бути використані феродинамічні ватметри.

Якщо напруга в колі менша межі вимірювань ватметра за напругою, струм навантаження менший припустимого струму приладу, то схема включення ватметра в коло змінного струму аналогічна схемі включення ватметра в коло постійного струму (див. рис. 8.2). Щоб забезпечити правильне відхилення стрілки приладу від нуля, початки обмоток на панелі ватметра позначені крапкою або зірочкою. Затискачі, позначені таким чином, називаються генераторними, тому що їх підключають до джерела енергії.

Якщо струм навантаження більший 10-20 А, то струмову котушку ватметра включають через вимірювальний трансформатор струму.

Для вимірювань потужності в колах змінного струму з низьким коефіцієнтом потужності застосовують спеціальні низькосинусні ватметри. На їх шкалі зазначено, для яких $\cos\varphi$ вони призначені.

При вимірюванні потужності у високовольтному колі змінного струму використовують вимірювальні трансформатори струму і напруги (рис. 8.3). Струмову котушку ватметра включають у вторинну обмотку вимірювального трансформатора струму, котушку напруги – у вторинну обмотку вимірювального трансформатора напруги. Для визначення дійсного значення потужності показники ватметра P_W множать на коефіцієнти k_I і k_U трансформації за струмом і напругою:

$$P = n \cdot C_P \cdot k_I \cdot k_U = P_W \cdot k_I \cdot k_U, \quad (8.8)$$

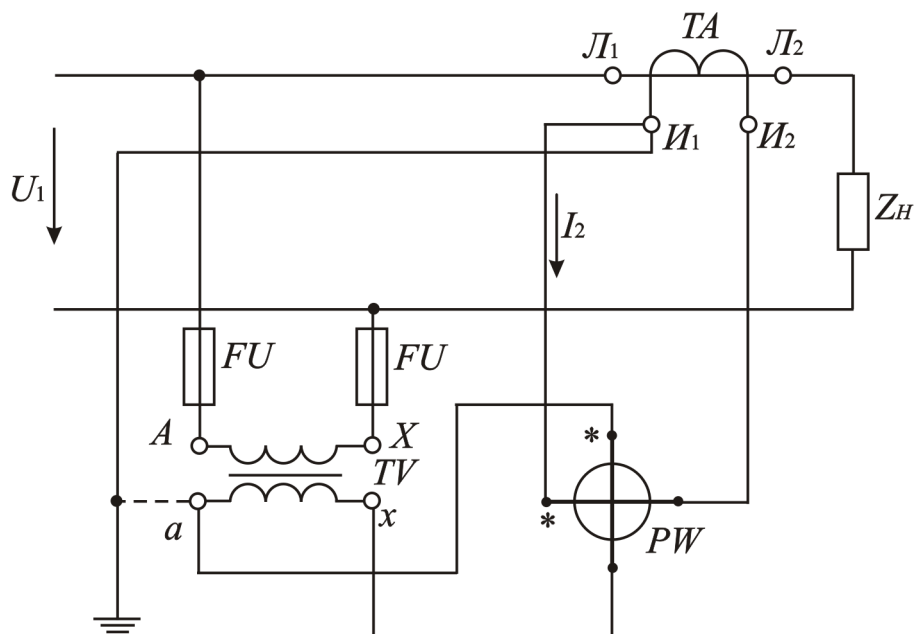


Рис. 8.3 – Включення ватметра для вимірювань потужності у високовольтному колі змінного струму

Через можливу появу високої напруги в колі вторинних обмоток трансформатора початки вторинних обмоток заземлюють. Для захисту обмоток

вимірювального трансформатора напруги від появи можливого струму короткого замикання первинну обмотку підключають через плавкі запобіжники або автоматичні вимикачі.

8.2.2. Вимірювання реактивної потужності в однофазних колах змінного струму

Реактивну потужність в однофазному колі змінного струму можна виміряти непрямим методом за допомогою трьох приладів: вольтметра, амперметра й ватметра. Значення реактивної потужності можна розрахувати за формулою

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}, \quad (8.9)$$

де S – повна потужність; P – показники ватметра; U – показники вольтметра; I – показники амперметра.

8.2.3. Вимірювання активної потужності в трифазних трипровідних колах змінного струму

Якщо навантаження в трифазній трипровідній мережі симетричне і з'єднане в зірку, то для вимірювань потужності навантаження достатньо одного ватметра. Ватметр включають таким чином, щоб він показував потужність однієї фази, рис. 8.4, а, тоді загальна потужність буде більшою показників ватметра втричі:

$$P = 3 \cdot P_W, \quad (8.10)$$

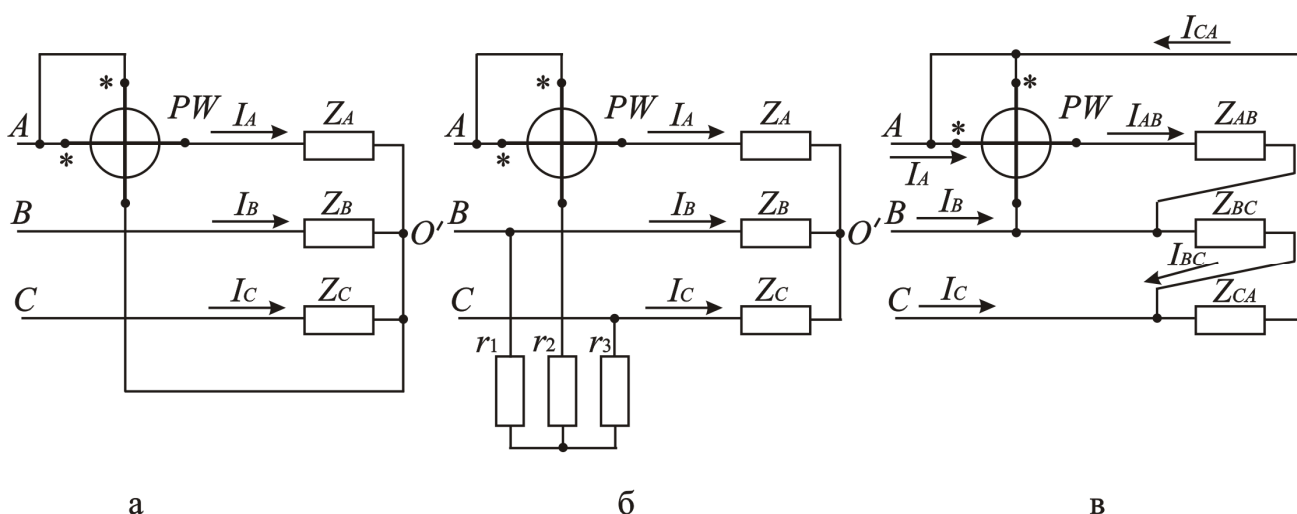


Рис. 8.4 – Вимірювання активної потужності в симетричних трифазних трипровідних колах змінного струму

а – при симетричному навантаженні, з'єднаному в зірку;

б – зі штучною нульовою точкою;

в – при симетричному навантаженні, з'єднаному в трикутник

Струмову котушку ватметра включають на струм будь-якої фази (наприклад, A). Котушку напруги включають на напругу цієї ж фази, тобто між лінійним проводом фази й нульовою точкою споживача. Якщо нульова точка недоступна або її немає, то можна одержати штучну нульову точку (рис. 8.4, б). Цей метод можливий тільки при використанні електродинамічного ватметра. Для цієї мети підбирають три резистори так, щоб $R_1 = R_2 = R_3 + R_V$, де R_V – опір котушки напруги ватметра.

При включенні навантаження трикутником струмову котушку включають на струм фази, наприклад, фази AB (рис. 8.4, в) I_{AB} , а котушку напруги – на лінійну напругу U_{AB} . Потужність трифазного навантаження визначають за формулою (8.10).

Активну потужність трифазного несиметричного навантаження можна виміряти за допомогою двох ватметрів, якщо включити їх за схемою, показаною на рис. 8.5.

Значення активної потужності трифазного навантаження можна розрахувати за формулою

$$P = U_{CA} \cdot I_A \cdot \cos \psi_1 + U_{BC} \cdot I_B \cdot \cos \psi_2 = P_{W1} + P_{W2}, \quad (8.11)$$

де U_{CA} , U_{BC} – лінійні напруги; I_A , I_B – лінійні струми; ψ_1 , ψ_2 – кути зсуву між відповідними напругами й струмами; P_{W1} , P_{W2} – показники першого і другого ватметрів.

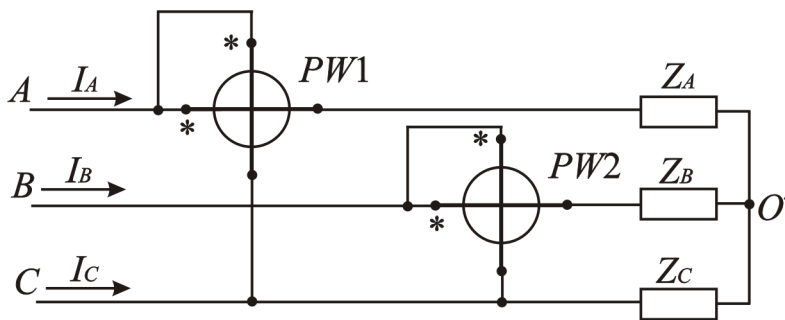


Рис. 8.5 – Вимірювання активної потужності трифазного несиметричного навантаження

При вимірюванні потужності двома ватметрами є можливість орієнтовно судити за їх показниками про значення коефіцієнта потужності трифазного навантаження. Наприклад, якщо навантаження в трьох фазах активне і симетричне, то показники двох ватметрів будуть однакові. Якщо навантаження носить активно-індуктивний характер і $\cos \varphi = 0,5$, тобто кут $\varphi = 60^\circ$, то кут $\psi_1 = 30^\circ$, а кут $\psi_2 = 90^\circ$. Показники ватметрів будуть наступними: $P_{W1} = U_{л} \cdot I_{л} \cdot 0,866$, $P_{W2} = U_{л} \cdot I_{л} \cdot 0 = 0$. Якщо показники одного ватметра дорівнюють нулю, це означає, що $\cos \varphi$ зменшився до 0,5.

Активну потужність в трифазних колах можна виміряти за допомогою спеціальних трифазних ватметрів. Такі ватметри в одному корпусі мають дві нерухомі котушки напруги, розташовані на одній осі зі стрілкою (рис. 8.6). При підключенні ватметра лінійні дроти A і C , що з'єднані з генератором, підключають до початків струмових котушок, провід B – до затискача B ватметра та ставлять дві перемички 1 і 2.

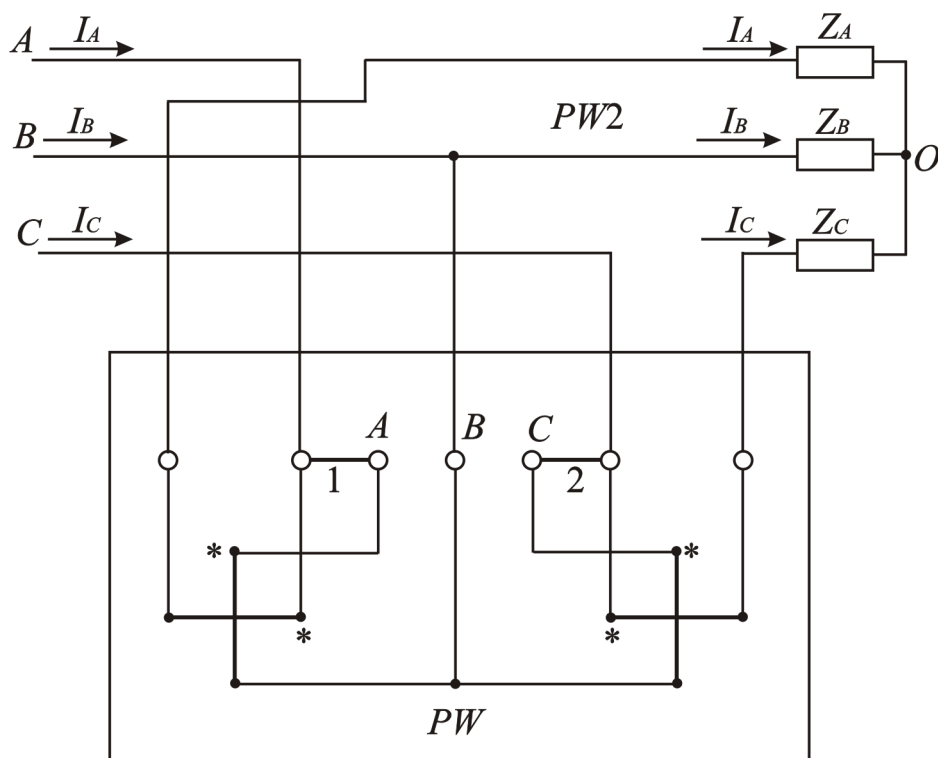


Рис. 8.6 – Схема підключення трифазного ватметра

8.2.4. Вимірювання активної потужності в трифазних чотирипровідних колах змінного струму

Для вимірювання потужності в трифазних чотирипровідних колах можна скористатися одним із призначених для цього ватметрів. Якщо такого ватметра немає, то при симетричному навантаженні достатньо включити один ватметр (рис. 8.7, а). Тоді значення потужності трифазного приймача можна визначити за формулою (8.10).

Якщо навантаження несиметричне, то потрібно включити три ватметра – по одному в кожен фазу (рис. 8.7, б). Тоді сума показників трьох ватметрів буде давати значення активної потужності трифазного приймача:

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (8.12)$$

8.2.5. Вимірювання реактивної потужності в трифазному колі змінного струму

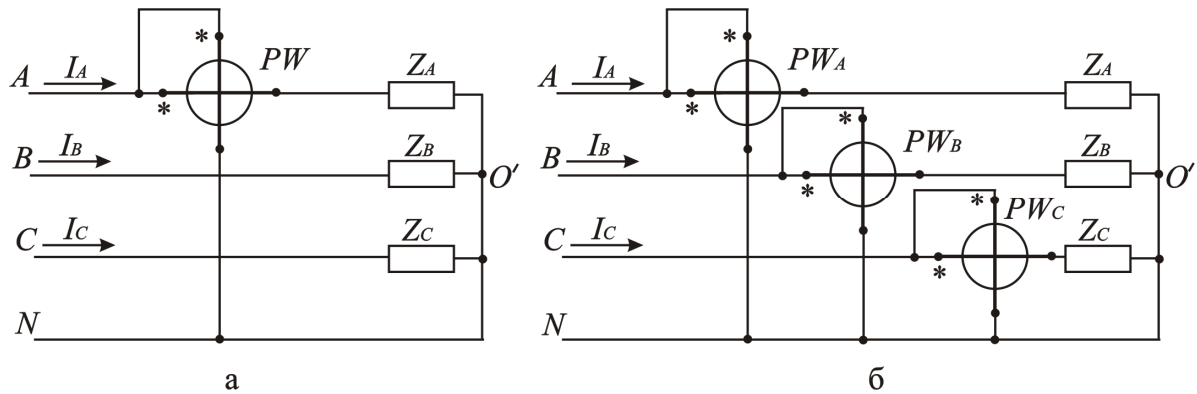


Рис. 8.7 – Вимірювання активної потужності в трифазних чотирипровідних колах
а – при симетричному навантаженні; б – при несиметричному навантаженні

У ватметрі для вимірювань реактивної потужності (варметр) трифазної мережі є дві основні струмові котушки і дві допоміжні (рис. 8.8). Основні струмові котушки зазвичай включають: одну на струм I_A , іншу – на струм I_C . Допоміжні обмотки включають послідовно й зустрічно в фазу B . У цьому приладі сума чотирьох обертаючих моментів пропорційна реактивній потужності трифазного приймача при будь-якому навантаженні.

У трифазному симетричному колі реактивну потужність можна виміряти за допомогою одного ватметра (рис. 8.9). При цьому його струмову котушку включають на струм будь-якої фази, наприклад, фази A , а котушку напруги – на інші фази, наприклад, фази B і C . Ватметр покаже добуток струму I_A на напругу U_{BC} і на косинус кута зсуву між ними:

$$P_W = I_A \cdot U_{BC} \cdot \cos \psi = I_A \cdot U_{BC} \cdot \cos(90 - \varphi) = I_A \cdot U_{BC} \cdot \sin \varphi. \quad (8.13)$$

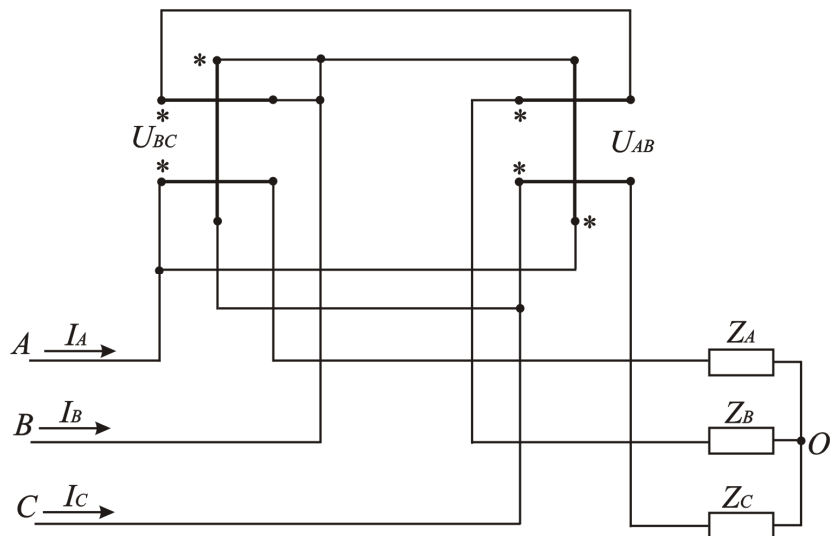


Рис. 8.8 – Підключення трифазного варметра для вимірювань реактивної потужності в трифазному колі змінного струму

Якщо помножити (8.13) на $\sqrt{3}$, то одержимо вираз для визначення реактивної потужності трифазного навантаження:

$$Q = I_A \cdot U_{BC} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi = P_W \cdot \sqrt{3}. \quad (8.14)$$

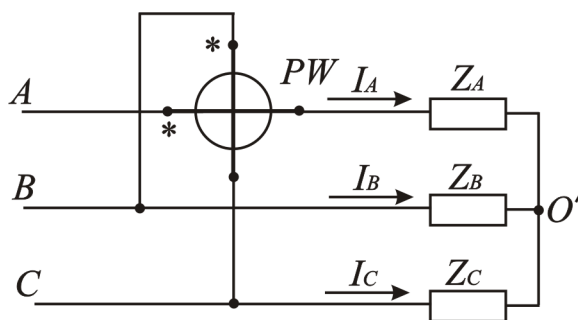


Рис. 8.9 – Вимірювання реактивної потужності в симетричному трифазному колі

При несиметричному навантаженні в трифазній мережі змінного струму реактивну потужність можна визначити за допомогою трьох ватметрів, струмові котушки яких включаються на лінійні струми, а котушки напруги – на інші фази (рис. 8.10).

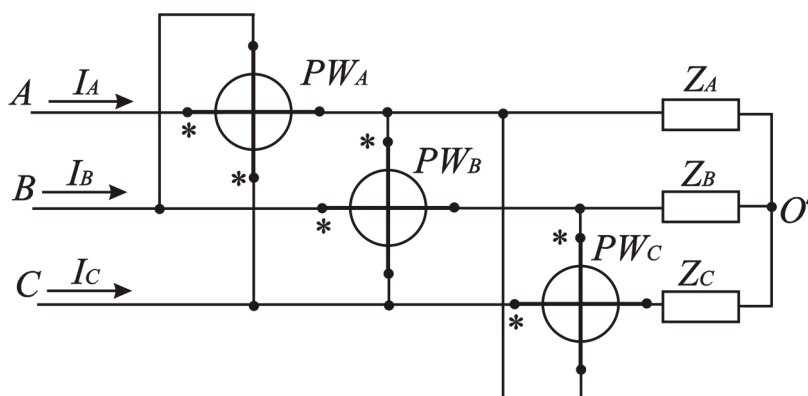


Рис. 8.10 – Вимірювання реактивної потужності в несиметричному трифазному колі

У цьому випадку реактивну потужність можна знайти за формулою

$$Q = \frac{P_{WA} + P_{WB} + P_{WC}}{\sqrt{3}}. \quad (8.15)$$

На рис. 8.11 показаний зовнішній вигляд лабораторного електродинамічного однофазного вольтметра Д5093 (рис. 8.11, а) і щитового трифазного мегаватметра Д345 (рис. 8.11, б). Ватметр Д5093 має клас точності 0,5, діапазон вимірювань від 1,5 Вт до 60 Вт, номінальний коефіцієнт потужності 1, нормальний діапазон частот від 45 до 65 Гц, робочий діапазон частот понад 150 до 500 Гц, номінальний струм від 0 до 1 А. Мегаватметр Д345, призначений для вимірювань активної та реактивної потужності в трифазних

трипровідних колах частотою 50 Гц, має клас точності 1,5, діапазон вимірювань від 0 до 1,2 МВт, номінальний струм від 0 до 5000 А.



а



б

Рис. 8.11 – Зовнішній вигляд ватметрів
а – однофазного Д5093; б – трифазного Д345

РОЗДІЛ 9. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ Й ПОКАЗНИКІВ ЇЇ ЯКОСТІ

9.1. Вимірювання активної електричної енергії

Значення електричної енергії, споживаної в колі постійного струму, визначається за формулою

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t, \quad (9.1)$$

де P – потужність навантаження; t – час, за який визначається споживана енергія; U – напруга, що подається до навантаження; I – струм, споживаний навантаженням.

З (9.1) випливає, що виміряти споживану енергію можна за допомогою ватметра й секундоміра або за допомогою вольтметра, амперметра й секундоміра. При цьому точність проведених вимірювань буде невелика.

Тому вимірювання активної й реактивної енергії в однофазних і трифазних колах змінного струму проводиться за допомогою спеціальних інтегруючих механізмів – однофазних і трифазних електричних лічильників.

Для обліку електроенергії в колах змінного струму частотою 50 Гц часто використовуються індукційні лічильники (СО-2М, СО-5У, СО-И470, СО-И445Э, СО-ЭЭ6706 і ін.).

Схема включення однофазного лічильника в низьковольтну мережу зі струмом меншим номінального, аналогічна схемі включення ватметра й показана на рис. 9.1. Струмова котушка включається послідовно з навантаженням, а котушка напруги – паралельно навантаженню.

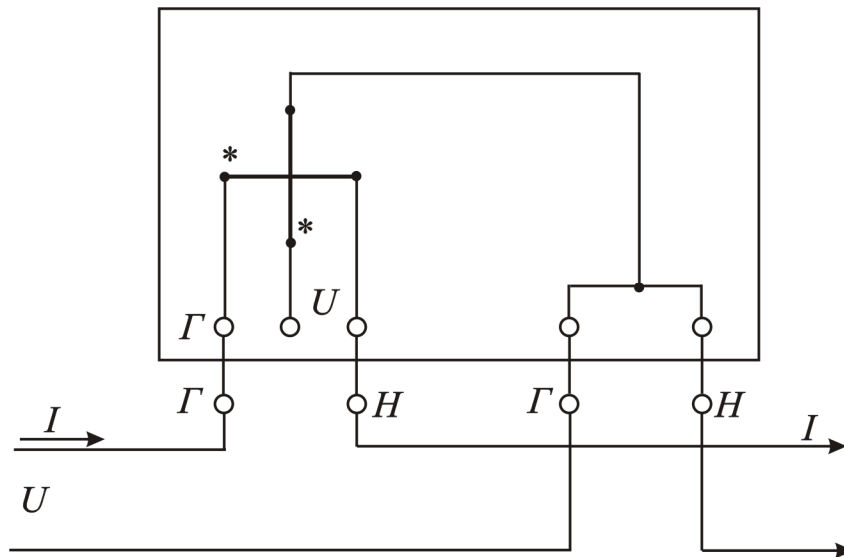


Рис. 9.1 – Схема включення лічильника в низьковольтну мережу

Для обліку активної електричної енергії в трифазних мережах використовуються спеціальні лічильники активної енергії (САЗ-И667, САЗУ-И667, САЗ-И670М, САЗУ-И670М і ін.).

Схема безпосереднього включення трифазного лічильника в мережу наведена на рис. 9.2.

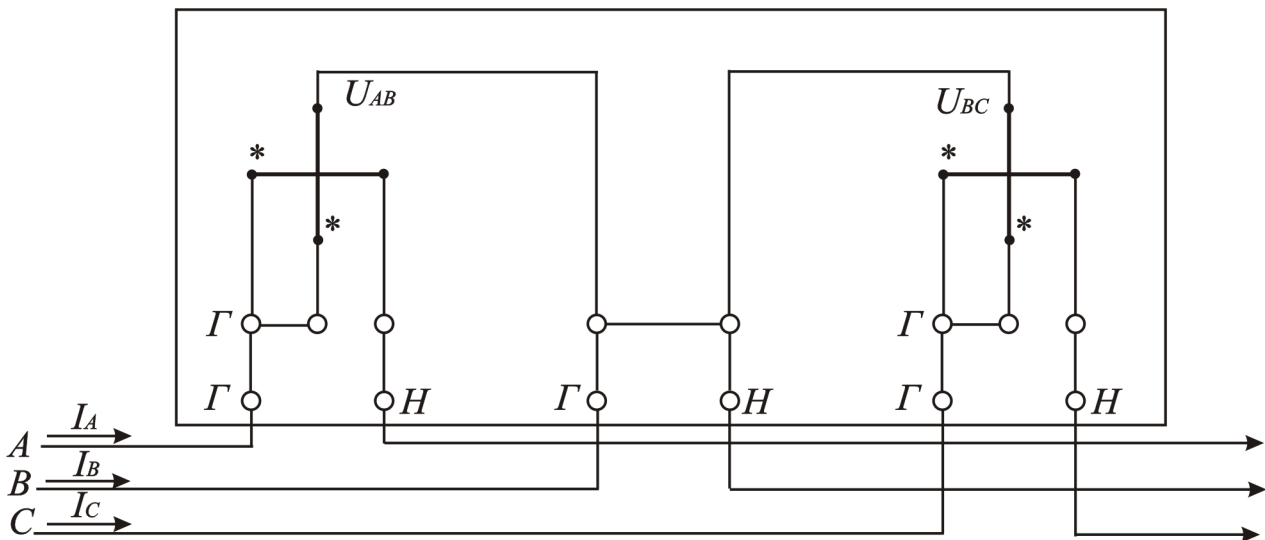


Рис. 9.2 – Схема включення трифазного лічильника в мережу

За точністю обліку електричної енергії лічильники можуть бути наступних класів точності: 0,5; 1,0; 2,0 і 2,5.

Для обліку електричної енергії в трифазній чотирипровідній мережі використовуються спеціальні триелементні лічильники типу САЧ. Схема підключення такого лічильника показана на рис. 9.3.

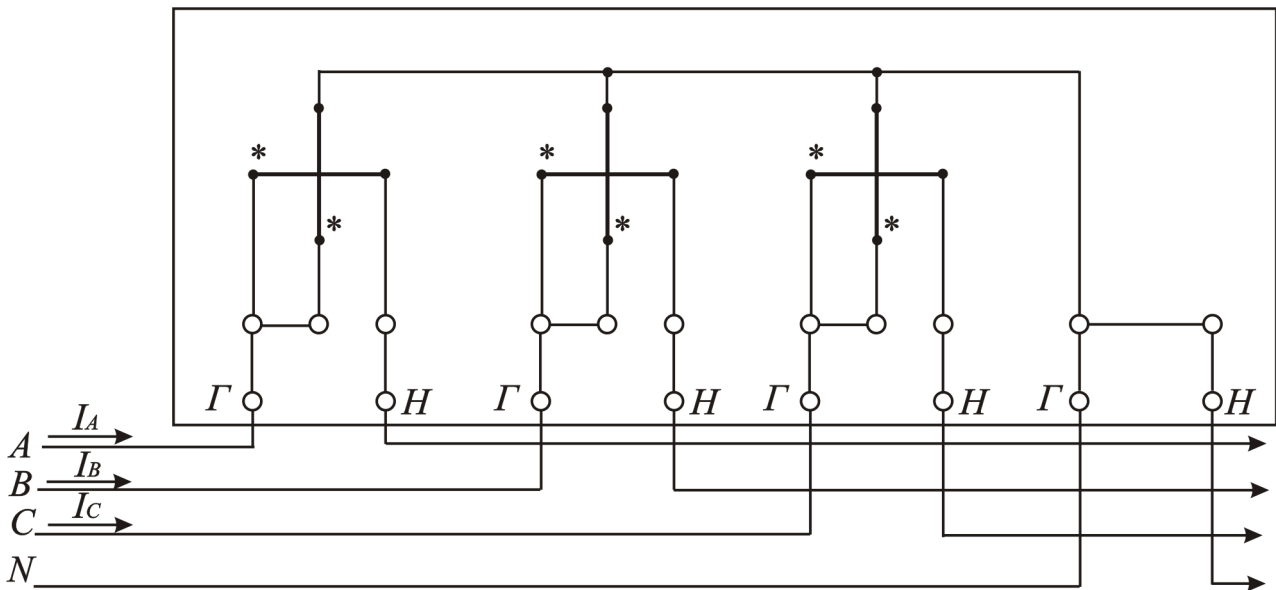


Рис. 9.3 – Схема включення триелементного лічильника в мережу

На рис.9.4 показаний зовнішній вигляд однофазного СО-ЭЭ6706 (рис. 9.4, а) і трифазного САЗ-И667 (рис. 9.4, б) лічильників активної електричної енергії. Однофазний лічильник СО-ЭЭ6706 відповідає класу точності 2,0. Максимальний струм 400% від номінального струму. Повна й активна потужність, споживана колом напруги при номінальній напрузі і частоті, – 5,5 ВА й 1,2 Вт відповідно. Повна потужність, споживана колом струму, – 0,35 ВА. Поріг чутливості 0,5% номінального струму. Трифазний лічильник САЗ-И667 має клас точності 2,0. Максимальний струм 100 А. Поріг чутливості 0,5% номінального струму. Потужність, споживана колом струму, – 2,5 ВА. Потужність, споживана колом напруги, – 1,5 Вт – активна й 5 ВА – повна.



а



б

Рис. 9.4 – Зовнішній вигляд лічильників активної електричної енергії
а – однофазний СО-ЭЭ6706; б – трифазний САЗ-И667

Останнім часом значного поширення набули цифрові лічильники електричної енергії. Тенденція їх застосування говорить про те, що вони витісняють індукційні лічильники із сектора обліку електроенергії практично всюди завдяки таким перевагам, як можливість передачі показників про споживання електроенергії дистанційно, множення на поточний тариф та ін.

Реалізація цифрового лічильника електричної енергії (рис. 9.5) вимагає спеціалізованих інтегральних схем (ІС), здатних робити перемножування сигналів і надавати отриману величину в зручній для мікроконтролера формі. Наприклад, перетворювач активної потужності – в частоту проходження імпульсів. Загальна кількість імпульсів, що прийшли, яку підраховує мікроконтролер, прямо пропорційна споживаній електроенергії.

Не менш важливу роль відіграють різні сервісні функції, такі як доступ до лічильника, дистанційне одержання інформації про накопичену енергію й багато іншого. Наявність цифрового дисплея, керованого від мікроконтролера, дозволяє програмно встановлювати різні режими виводу інформації, наприклад, виводити на дисплей інформацію про спожиту енергію щомісяця, за різними тарифами і т. д.

Для виконання деяких нестандартних функцій, наприклад, узгодження рівнів, використовуються додаткові ІС. Зараз почали випускати спеціалізовані ІС – перетворювачі потужності в частоту – і спеціалізовані мікроконтролери, що містять подібні перетворювачі на кристалі. Але найчастіше вони занадто дорогі для використання в комунально-побутових індукційних лічильниках. Тому багато світових виробників мікроконтролерів розробляють спеціалізовані мікросхеми, призначені для такого застосування.

Перейдемо до аналізу побудови найпростішого варіанта цифрового лічильника на найбільш дешевому 8-розрядному мікроконтролері Motorola. В наведеному рішенні реалізовані всі мінімально необхідні функції. Воно базується на використанні недорогого ІС-перетворювача потужності в частоту імпульсів КР1095ПП1 і 8-розрядного мікроконтролера МС68НС05КJ1 (рис. 9.6). При такій структурі мікроконтролеру потрібно підсумувати число імпульсів, виводити інформацію на дисплей і здійснювати її захист у різних аварійних режимах. Розглянутий лічильник фактично являє собою цифровий функціональний аналог існуючих механічних лічильників, пристосований до подальшого вдосконалення.

Сигнали, пропорційні напрузі й струму в мережі, знімаються з датчиків і надходять на вхід перетворювача. Інтегральна схема перетворювача перемножує вхідні сигнали, одержуючи миттєву споживану потужність. Цей сигнал надходить на вхід мікроконтролера, що перетворює його у Вт·год. і, по мірі накопичення сигналів, змінює покази лічильника. Часті збої напруги живлення викликають необхідність використання EEPROM для збереження показників

лічильника. Оскільки перебої в живленні є найбільш характерною аварійною ситуацією, такий захист необхідний в будь-якому цифровому лічильнику.

Навантаження

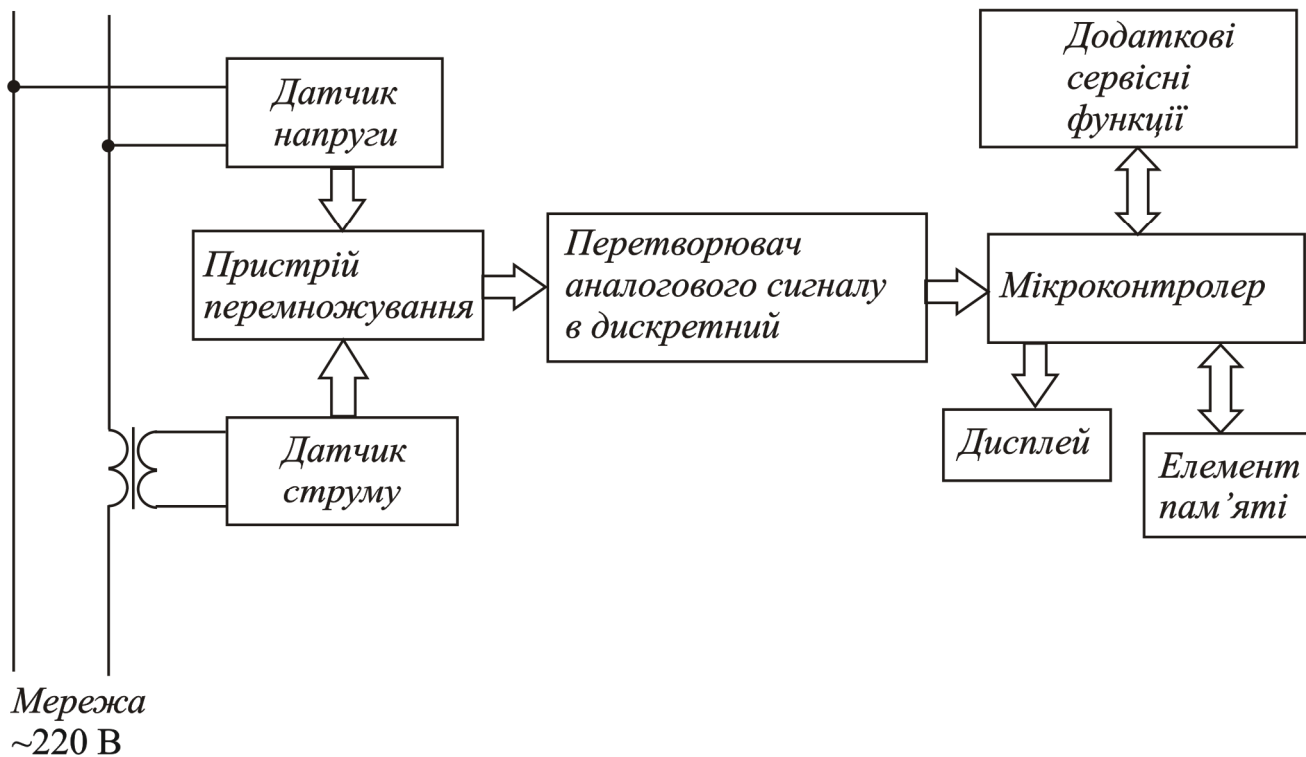


Рис. 9.5 – Блок-схема реалізації цифрового лічильника електроенергії

Навантаження

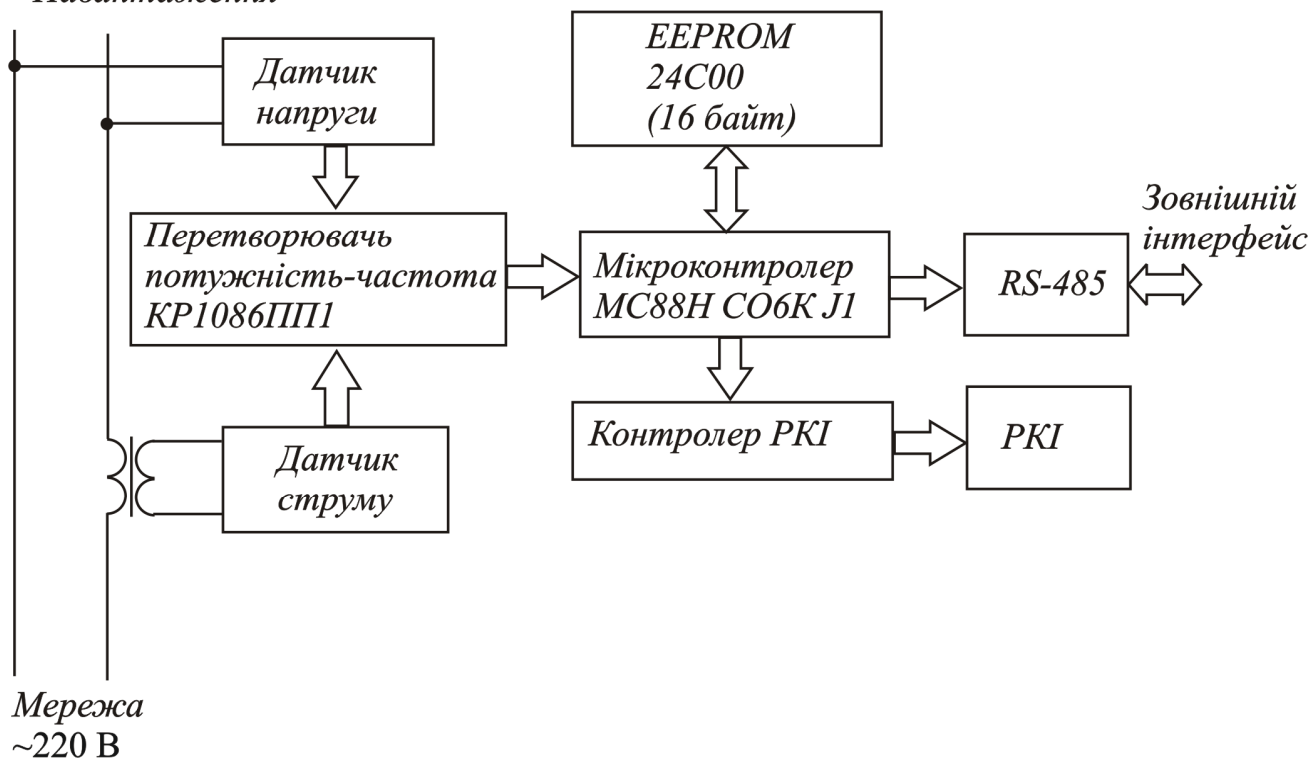


Рис. 9.6 – Блок-схема реалізації цифрового лічильника електроенергії на базі мікроконтролера MC68HC05KJ1

До сучасних цифрових лічильників електричної енергії можна віднести: СЭТ-4ТМ.03, СЭБ-24.07, МЕ, ED 2500 та ін.

Лічильник ED 2500 (рис. 9.7) має наступні характеристики: клас точності - 1,0; номінальна напруга – 220 В; номінальний (максимальний) струм – 5 (65) А; стала лічильника – 1000 імпульсів/квар-год.; споживана потужність – 1,8 В·А; інтерфейси даних: оптичний інтерфейс до 4800 бод, електронний інтерфейс RS485 до 9600 бод, протоколи даних IEC 62056-21.



Рис. 9.7 – Зовнішній вигляд цифрового лічильника електроенергії ED 2500

9.2. Вимірювання реактивної електричної енергії

Реактивну електричну енергію враховують за допомогою лічильників реактивної енергії. Випускаються лічильники: СРЧ-И673М, СРЧ-И689, СР4-И673М, СР4-И673, СР4-И679, СР4-5003 і др.

На рис.9.8 показана схема включення індукційного лічильника типу СРЧ-И637М безпосередньо в три- і чотирипровідну мережу. Зі схеми зрозуміло, що струмові котушки лічильника включені на лінійні струми, а котушки напруги – на напруги інших фаз, так само як і при включенні ватметрів для вимірювань реактивної потужності в трифазних колах.

9.3. Вимірювання коефіцієнта потужності й фазового зсуву

Для вимірювань коефіцієнта потужності найкраще скористатися фазометром. Побічно коефіцієнт потужності визначається за показниками амперметра, вольтметра і ватметра:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}, \quad (9.2)$$

де P , U , I – показники ватметра, вольтметра і амперметра.

У колі трифазного струму:

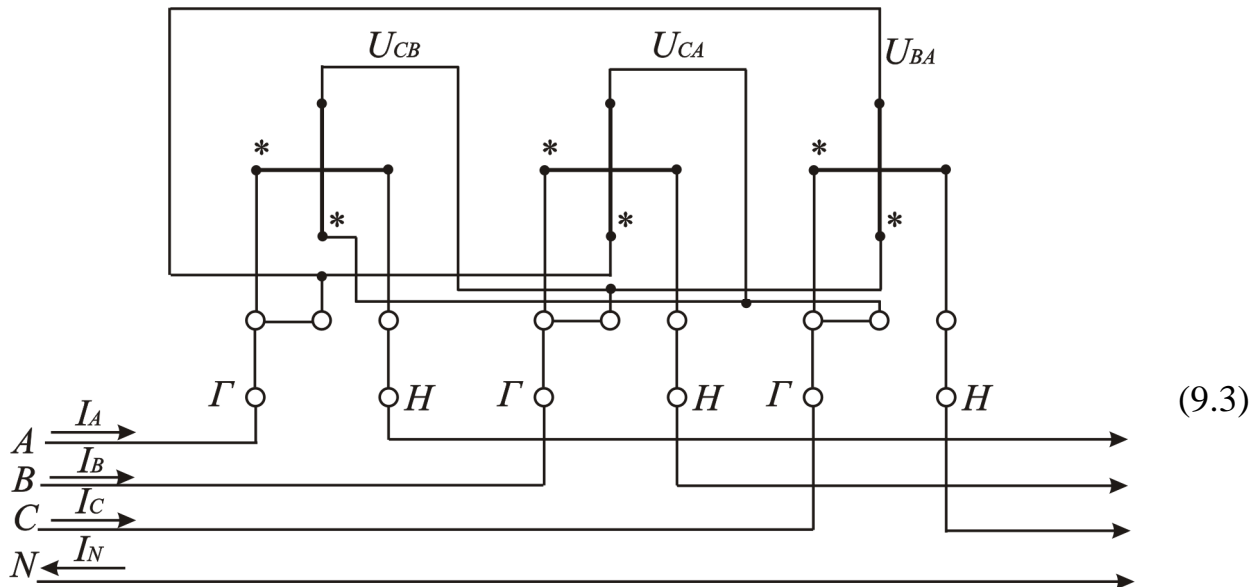


Рис. 9.8 – Схема включення лічильника реактивної електроенергії

$$\cos \varphi = \frac{P_W}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L},$$

де P_W – потужність всієї системи; U_L, I_L – лінійні напруга й струм, вимірювані вольтметром і амперметром.

У симетричній трифазній мережі коефіцієнт потужності можна визначити за показниками двох ватметрів:

$$\cos \varphi = \frac{P_{W1} + P_{W2}}{2 \cdot \sqrt{P_{W1}^2 + P_{W2}^2 - P_{W1} \cdot P_{W2}}}. \quad (9.4)$$

Чисельне значення коефіцієнта потужності залежить від характеру навантаження. Якщо навантаженням є лампи розжарювання або нагрівальні прилади, то $\cos \varphi = 1$; якщо навантаження містить асинхронні двигуни, то $\cos \varphi < 1$. При вимірюванні коефіцієнта потужності електродвигунів перший істотно змінюється від 0,1 на холостому ході до 0,86-0,92 при номінальному навантаженні. Тому на практиці в електричних мережах визначають так званий середньозважений коефіцієнт потужності за якийсь певний час, припустимо, за добу або за місяць. Для цього наприкінці розглянутого періоду знімають показники лічильників активної й реактивної енергії W_a і W_p і визначають середньозважене значення коефіцієнтів потужності:

$$\cos \varphi_{cp.63} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}}. \quad (9.5)$$

Виміряти безпосередньо фазовий зсув між напругою і струмом можна за допомогою електродинамічних і феродинамічних фазометрів.

Найпоширенішими є фазометри електродинамічної системи (рис. 9.9, а), у яких нерухома котушка включена послідовно з навантаженням, а рухомі котушки – паралельно навантаженню, але так, що струм однієї з них відстає від напруги на кут β_1 (рис. 9.9, б). Для цього послідовно з котушкою включене активно-індуктивне навантаження. Струм іншої котушки випереджає напругу на кут β_2 , для чого послідовно включене активно-ємнісне навантаження, причому $\beta_1 + \beta_2 = 90^\circ$ й $|I_1| = |I_2|$.

Кут відхилення стрілки такого приладу залежить тільки від значення $\cos \varphi$.

Для вимірювань фазового зсуву між двома напругами часто застосовують цифрові фазометри. В цифрових фазометрах прямого перетворення для вимірювань фазового зсуву останній перетворюють в інтервал часу і вимірюють. Досліджувані напруги подають на два входи приладу, на цифровому відліковому пристрої приладу знімають показники числа імпульсів, що надходять на лічильник приладу за один період досліджуваних напруг, які відповідають фазовому зсуву в градусах.

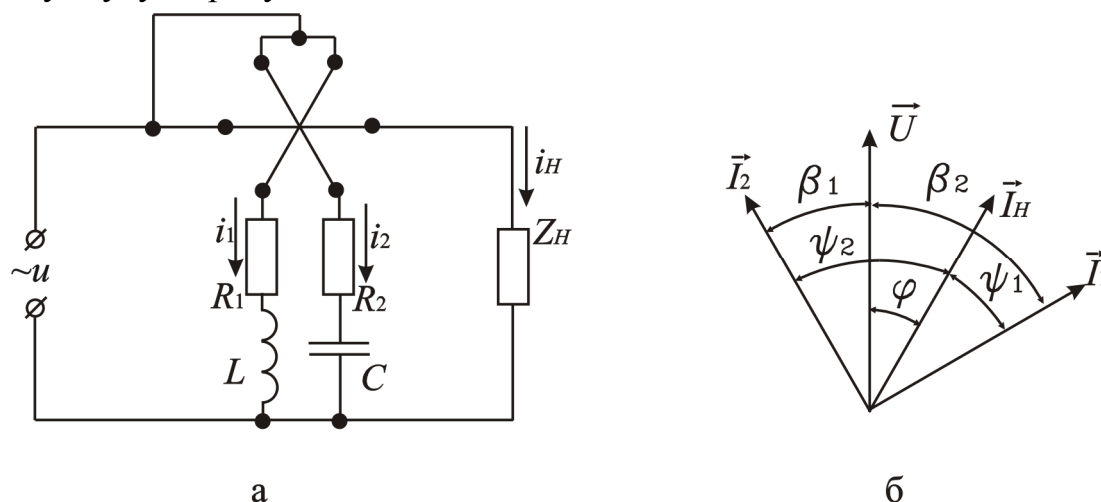


Рис. 9.9 – Вимірювання фазового зсуву за допомогою фазометра
а – схема підключення фазометра; б – векторна діаграма

Промисловість випускає щитові фазометри типу Ц302/1 (рис. 9.10), призначені для вимірювань коефіцієнта потужності в діапазонах 0,5-1-0,5 і 0,9-1-0,2 в трифазних трипровідних мережах змінного струму частотою 50 Гц. Номінальні значення струму приладу при підключенні безпосередньо через вимірювальний трансформатор – 5 А. Номінальні напруги – 127, 220, 380 В. Клас точності 2,5.

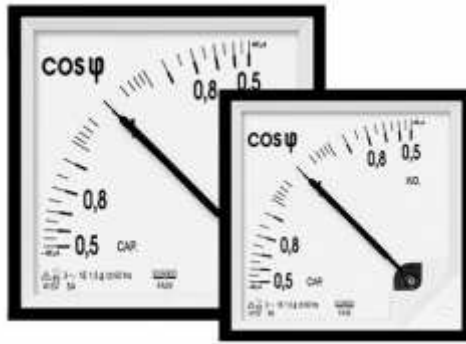


Рис. 9.10 – Зовнішній вигляд фазометра Ц302/1

Для однофазних кіл є зручними переносні фазометри типу Д578 (рис. 9.11). Клас точності приладу 0,5. Межі вимірювань 0-1-0.



Рис. 9.11 – Зовнішній вигляд фазометра Д578

Із цифрових фазометрів як приклад можна виділити щитовий фазометр серії Р (рис. 9.12).



Рис. 9.12 – Зовнішній вигляд цифрового фазометра серії Р

Фазовий зсув між двома періодичними напругами можна виміряти за допомогою осцилографа методом еліпса або за осцилограмами досліджуваних напруг.

У першому випадку досліджувані сигнали U_1 і U_2 подають на входи X і Y осцилографа. Якщо частоти напруг рівні, то використовують метод еліпса. Зазвичай посилення X і Y регулюють так, щоб повні відхилення сигналів за осями були рівні, тоді на екрані осцилографа буде отримане зображення еліпса (рис. 9.13, а). Визначивши розміри X і X_m , можна обчислити фазовий зсув:

$$\sin \varphi = \frac{X}{X_m}. \quad (9.6)$$

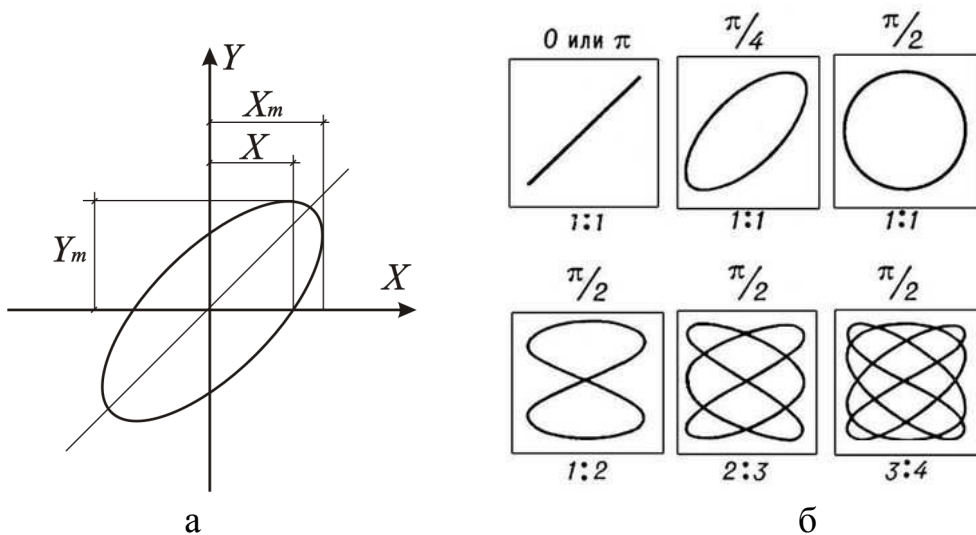


Рис. 9.13 – Визначення фазового зсуву за допомогою осцилографа
 а – методом еліпса; б – за фігурами Лісажу

Похибка цього методу 1-2%. Чим ближче кут φ до 90° , тим більша похибка.

Фазовий зсув між двома періодичними напругами різної частоти можна визначити за фігурами Лісажу, що виникають на екрані осцилографа, якщо відношення частот виражається раціональними числами. У цьому випадку результуюча крива замкнута й показана на екрані у вигляді нерухомого зображення (рис. 9.13, б).

Фазовий зсув можна виміряти методом лінійної розгортки за допомогою двопробеневого осцилографа або однопробеневого осцилографа з комутатором. У цьому випадку на екрані осцилографа встановлюються нерухомі осцилограми обох напруг (рис. 9.14). Якщо виміряти відрізки ab і ac , що відповідають часу t_φ і T , то можна обчислити значення фази:

$$\varphi_x = \frac{l_{ab} \cdot 360}{l_{ac}}. \quad (9.7)$$

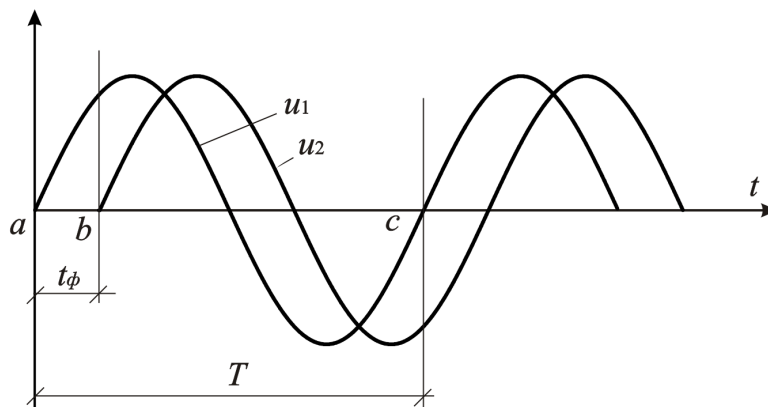


Рис. 9.13 – Вимірювання фазового зсуву методом лінійного розгорнення
 Похибка методу визначається неточністю вимірювань відрізків ab і ac .

РОЗДІЛ 10. ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

Електричні й магнітні вимірювання перебувають у тісному зв'язку внаслідок єдності електричних і магнітних явищ. За допомогою магнітних вимірювань вирішується низка завдань, до яких відносяться дослідження магнітних властивостей речовин і матеріалів, дослідження різних видів електромагнітних механізмів, апаратів і машин для виявлення розподілу магнітних потоків і МРС, контроль якості магнітних матеріалів і виробів з них у виробничих умовах, випробування постійних магнітів і електромагнітів, дослідження магнітного поля Землі, вивчення фізичних властивостей матеріалів за їх магнітними характеристиками.

У більшості випадків при визначенні характеристик магнітних полів і матеріалів магнітні величини розраховують за експериментально отриманими значеннями електричних величин або електричних параметрів.

Магнітні характеристики прийнято поділяти на статичні й динамічні.

Статичні характеристики магнітних матеріалів визначають у постійних магнітних полях і використовують як для розрахунку пристроїв, де ці матеріали працюють в таких самих умовах, так і для порівняння одних матеріалів з іншими.

Динамічні характеристики магнітних матеріалів вимірюють у змінних магнітних полях. Останні залежать не тільки від властивостей зразка, але й від частоти магнітного поля, форми кривої поля, форми та розмірів зразка.

Найпоширенішими магнітними величинами є магнітний потік, магнітна індукція і напруженість магнітного поля.

10.1. Вимірювання магнітного потоку в постійному магнітному полі

10.1.1. За допомогою балістичного гальванометра (індукційно-імпульсний метод)

Цей метод заснований на вимірюванні кількості електрики в імпульсі струму, що наводиться у вимірювальній котушці при зміні потокозчеплення. Для вимірювань магнітного потоку котушка з відомим числом витків w_k підключається до балістичного гальванометра через резистор R_d (рис. 10.1) і потім швидко виводиться з поля або вноситься в нього.

Зміна потоку, зчепленого з котушкою, спричиняє в ній ЕРС

$$e = -\frac{w_k \cdot d\Phi}{dt}, \quad (10.1)$$

яка визначає струм

$$i = \frac{e}{R} = -\frac{w_k}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (10.2)$$

де $R = R_\Gamma + R_K + R_D$ – загальний активний опір кола вимірювань, рівний сумі опорів гальванометра, котушки та додаткового резистора.

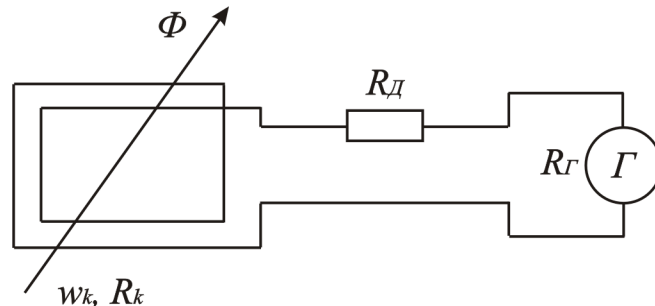


Рис. 10.1 – Вимірювання магнітного потоку за допомогою балістичного гальванометра

Зміна кількості електрики dQ пов'язана зі зміною потоку $d\Phi$:

$$dQ = idt = -\frac{w_k}{R} d\Phi. \quad (10.3)$$

Інтегруючи останнє рівняння в межах від 0 до t_1 , одержуємо співвідношення для кількості електрики в імпульсі струму, що визначається шляхом зміни потоку від Φ до 0 (виведення котушки з поля):

$$Q = \int_0^{t_1} idt = -\frac{w_k}{R} \int_{\Phi}^0 d\Phi = \frac{w_k}{R} \cdot \Phi. \quad (10.4)$$

Якщо вимірювальна котушка нерухома, а зміна потоку від $+\Phi$ до $-\Phi$ викликається зміною струму від $+I$ до $-I$, то кількість електрики в імпульсі струму, що протікає в колі, дорівнює:

$$Q = 2 \cdot \frac{w_k}{R} \cdot \Phi. \quad (10.5)$$

При досить незначній тривалості імпульсу струму в порівнянні з періодом вільних коливань гальванометра, можна вважати, що перше найбільше відхилення його покажчика α_{1m} пропорційне кількості електрики в імпульсі:

$$Q = C_Q \cdot \alpha_{1m}. \quad (10.6)$$

де C_Q – ціна розподілу (балістична постійна) гальванометра за кількістю електрики.

Підставляючи (10.6) в (10.4), одержуємо:

$$\Phi = \frac{R}{w_k} \cdot C_Q \cdot \alpha_{1m} = \frac{C_\Phi}{w_k} \cdot \alpha_{1m}. \quad (10.7)$$

де $C_{\Phi} = C_Q \cdot R$ – ціна розподілу (балістична постійна) гальванометра за магнітним потоком.

10.1.2. Веберметром

Веберметр призначений для прямого вимірювання магнітного потоку індукційно-імпульсним методом. Він являє собою магнітоелектричний гальванометр без протидіючого моменту. Градування веберметра практично не залежить від опору зовнішнього кола, якщо воно не перевищує значення, вказаного в паспортних даних приладу.

Промисловість виготовляє магнітоелектричні веберметри типів Ф191 (рис. 10.2, а) і М1119 (рис. 10.2, б) із ціною розподілу $5 \cdot 10^{-6}$ та 10^{-4} Вб/поз. Клас точності багатограничного мікровеберметра Ф191 становить 1,0 при опорі зовнішнього кола не більше 100-1000 Ом. У мілівеберметра М1119 клас точності 1,0 при опорі зовнішнього кола не більше 10 Ом.



Рис. 10.2 – Зовнішній вигляд веберметрів
а – мікровеберметра Ф191; б – мілівеберметра М1119

10.2. Вимірювання магнітної індукції й напруженості магнітного поля

10.2.1. Індукційно-імпульсний метод

Описаний вище метод вимірювань магнітного потоку із застосуванням балістичного гальванометра може бути використаний також для вимірювань магнітної індукції й напруженості магнітного поля. Якщо поле однорідне і площа витків вимірювальної котушки перпендикулярна до напрямку вектора магнітної індукції, то

$$B = \Phi \cdot S, \quad (10.8)$$

де S – площа витка.

З огляду на (10.7), маємо:

$$B = \frac{C_{\Phi}}{S \cdot w_k} \cdot \alpha_{1m}. \quad (10.9)$$

Для вимірювань магнітної індукції необхідно, як і при вимірюванні магнітного потоку, змінити потокозчеплення вимірювальної котушки, відрахувати перше найбільше відхилення покажчика балістичного гальванометра і зробити розрахунок за (10.9).

Вимірювання напруженості індукційно-імпульсним методом аналогічно вимірюванню магнітної індукції. Воно ґрунтується на відомій функціональній залежності між ними для вакууму й повітря

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{C_{\Phi}}{\mu_0 \cdot S \cdot w_k} \cdot \alpha_{1m} = \frac{C_{\Phi}}{k} \cdot \alpha_{1m}, \quad (10.10)$$

де μ_0 – магнітна постійна, рівна в системі СІ $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

k – стала вимірювальної котушки.

Постійна вимірювальної котушки може бути знайдена експериментально. Для цього котушку розташовують у полі, напруженість якого H_0 відома. Для створення зразкового поля застосовують спеціальну котушку, напруженість магнітного поля якої можна розрахувати. Постійну котушки визначають за відхиленням покажчика гальванометра при вмиканні або вимиканні струму котушки відповідно до (10.10):

$$k = \frac{C_{\Phi} \cdot \alpha_{1m1}}{H_0}. \quad (10.11)$$

10.2.2. За допомогою явища ядерного магнітного резонансу

Якщо на ядра якої-небудь речовини одночасно впливати постійним і змінним високочастотним магнітним полем, то при певному співвідношенні між індукцією постійного поля (B) і частотою змінного поля (ω) настає режим резонансного поглинання енергії ядрами цієї речовини. Відомо, що ядро атома може мати певне число орієнтацій у зовнішньому магнітному полі; для ядра атома водню – протона таких можливих орієнтацій дві: за полем й проти поля. Цим двом станам відповідає певна різниця енергій, що дорівнює $2 \cdot \mu_p \cdot B$, де μ_p – магнітний момент протона. Крім того, для переорієнтації протона з напрямку за полем в протилежний необхідний квант енергії $h \cdot f$, де h – універсальна постійна Планка, f – частота.

З вищенаведеного витікає, що

$$2 \cdot \mu_p \cdot B = h \cdot f \quad (10.12)$$

або

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{4 \cdot \pi}{h} \cdot \mu_p \cdot B = \gamma_p \cdot B, \quad (10.13)$$

де γ_p – гіромагнітне відношення протона, тобто відношення його магнітного моменту до механічного, відоме в цей час із високою точністю ($\gamma_p = 2,67512 \cdot 10^8$ 1/(Тл·с)).

З останнього співвідношення зрозуміло, що

$$B = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\gamma_p}. \quad (10.14)$$

Структурна схема установки для визначення індукції постійного магнітного поля представлена на рис.10.3.

У вимірюване магнітне поле розміщується котушка коливального контуру генератора, всередині якої знаходиться скляна ампула з робочою речовиною, що містить ядра водню (протони) або ядра інших елементів, наприклад, літію або дейтерію, що мають значення гіромагнітних відношень ядер, відмінні від гіромагнітного відношення протона – це дозволяє розширити діапазон вимірювань. Як робочі речовини часто застосовують звичайну воду, водяний розчин хлористого літію, а також важку воду.

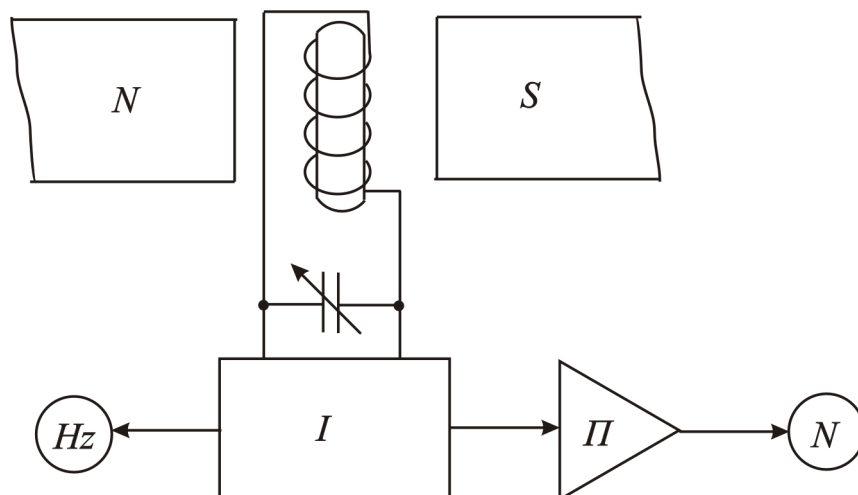


Рис. 10.3 – Структурна схема установки для визначення індукції постійного магнітного поля

Для визначення моменту резонансу змінюють частоту коливань генератора і ведуть пошук резонансного сигналу за допомогою електронно-променевого осцилографа. Підсилювач (П) призначений для підсилення малого сигналу. Резонансна частота визначається частотоміром Hz.

Метод застосовується для вимірювань індукції й напруженості однорідних магнітних полів з похибкою, що не перевищує 0,01%.

Промисловість випускає ряд вимірювальних приладів, дія яких заснована на явищі ядерного магнітного резонансу: це тесламетри типів Ш1-1, Ш1-2 і вимірювачі напруженості магнітного поля типу Е 11-2.

10.2.3. З використанням ефекту Холу

Ефект Холу полягає в появі ЕРС E_x між протилежними сторонами пластини з металу або напівпровідникового матеріалу, якщо через пластину пропустити струм і помістити її при цьому в магнітне поле. Напрямки струму, вектора магнітної індукції й ЕРС Холу взаємно перпендикулярні (рис. 10.4). Для виготовлення перетворювачів Холу зазвичай застосовують напівпровідники (германій, сурм'янистий індій, миш'яковистий індій і ін.), тому що вони дають значно більшу ЕРС Холу, ніж метали.

Магнітна індукція, струм і ЕРС Холу зв'язані між собою в такий спосіб:

$$E_x = \frac{R_x \cdot I \cdot B}{d}, \quad (10.15)$$

де R_x – постійна Холу; d – товщина пластини.

З (10.15)

$$B = \frac{E_x \cdot d}{R_x \cdot I}. \quad (10.16)$$

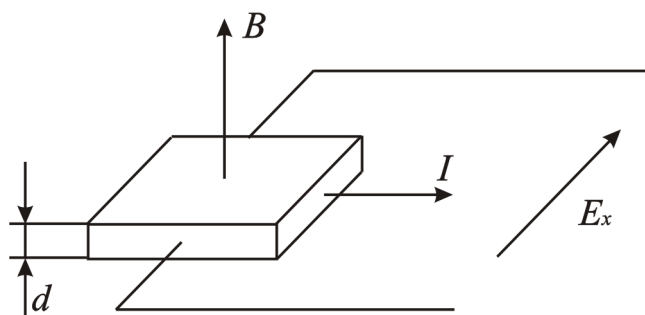


Рис. 10.4 – Демонстрація ефекту Холу

Основною перевагою перетворювачів Холу є пропорційність ЕРС Холу індукції, малі розміри й маса, можливість їх використання для вимірювань як постійних, так і змінних полів до частот 10^{12} Гц. За допомогою перетворювачів Холу можна виміряти магнітну індукцію в діапазоні від 0,001 до 1-2 Тл. Головний недолік – залежність постійної Холу від температури.

Промисловість випускає ряд тесламетрів, побудованих на ефекті Холу: Ш1-8, ДХК-0.5А, 43205, «Маяк-2М», «Топаз», ТХ-4/1 (рис. 10.5).

Тесламетр ТХ-4/1 має діапазон вимірювань індукції постійного магнітного поля від 20 мТл до 10 Тл, а змінного магнітного поля від 20 до 200 мТл. Клас точності приладу 5,0.

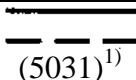

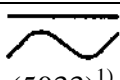


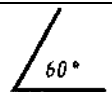
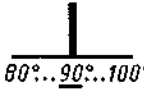
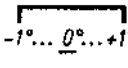
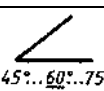


Рис. 10.5 – Зовнішній вигляд тесламетра ТХ-4/1

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Фремке А. В. Электрические измерения [Текст]: учебник / А. В. Фремке, А. Е. Душина; Л. : Энергия, 1980. – 382 с.
2. Поліщук Є. С. Метрологія та вимірювальна техніка [Текст]: підручник / Є. С. Поліщук; Львів : Новий світ, 2003. – 460 с.
3. Котур В. І. Електричні виміри і електровимірювальні прилади [Текст]: підручник / В. І. Котур, М. Н. Скомська, Н. Н. Храмова; К. : Енергоіздат, 1996. – 324 с.
4. Молиновский В. Н. Электрические измерения [Текст]: учебник / В.Н. Молиновский; М. : Энергоиздат, 1982. – 392 с.
5. Полищук Е. С. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин [Текст]: учебник / Е. С. Полищук; К. : Вища школа, 1984. – 386 с.
6. Панев Б. И. Электрические измерения. Справочник в вопросах и ответах [Текст]: учебник / Б. И. Панев; М. : Агропромиздат, 1987. – 224 с.
7. Дворяшин Б. В. Основы метрологии и радиоизмерения [Текст]: учебник/ Б. В. Дворяшин; М. : Радио и связь, 1993. – 320 с.
8. Карев В.Н. Задачи для лабораторных работ по курсу «Основы метрологии» для контроля знаний [Текст]: пособие / В. Н.Карев, Е. П.Волкова; Х. : ХИИГХ, 1990. – 78 с.




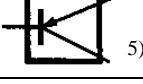

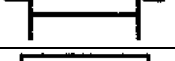
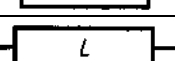
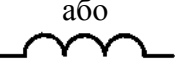
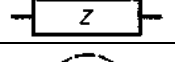









Додаток А – ПОЗНАЧЕННЯ МАРКУВАННЯ ПРИБЛАДІВ І ДОПОМІЖНИХ ЧАСТИН

Номер символу	Найменування	Позначення символу	
В. Рід величини, що вимірюється, і кількість елементів вимірювання			
В-1	Коло постійного струму і (або) вимірювальний елемент, що реагує на постійний струм	 (5031) ¹⁾	
В-2	Коло змінного струму і (або) вимірювальний елемент, що реагує на змінний струм	 (5032) ¹⁾	
В-3	Коло постійного струму і (або) змінного струму і (або) вимірювальний елемент, що реагує на постійний і змінний струм	 (5033) ¹⁾	
В-4	Трифазна схема змінного струму (основне позначення)	3 ~ ²⁾	3)
В-6	Один вимірювальний елемент (E) для трипровідного кола	3 ~ 1E ²⁾	
В-7	Один вимірювальний елемент (E) для чотирипровідного кола	3N ~ 1E ²⁾	
В-8	Два вимірювальних елемента (E) для трипровідного кола з несиметричними навантаженнями	3 ~ 2E ²⁾	
В-9	Два вимірювальних елемента (E) для чотирипровідного кола з несиметричними навантаженнями	3N ~ 2E ²⁾	
В-10	Три вимірювальних елемента (E) для чотирипровідного кола з несиметричними навантаженнями	3N ~ 3E ²⁾	
С. Безпека (для застосування дивись ДСТ Р 51350)			
Д. Положення при експлуатації			
D-1	Прилад для використання з вертикальним циферблатом		
D-2	Прилад для використання з горизонтальним циферблатом		
D-3	Прилад для використання з циферблатом з нахилом (наприклад, 60°) відносно горизонтальної площини		
D-4	Приклад для приладу, що використовується як D-1 з робочою областю застосування від 80° до 100°		
D-5	Приклад для приладу, що використовується як D-2 з робочою областю застосування від мінус 1° до плюс 1°		
D-6	Приклад для приладу, що використовується як D-3 з робочою областю застосування від 45° до 75°		
Е. Клас точності			
Е-1	Позначення класу точності (наприклад, 1), окрім тих випадків, коли нормуюче значення відповідає довжині шкали або значенню, що показується, або інтервалу вимірювання	1	

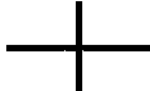
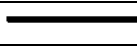

Додаток А (продовження)

E-2	Позначення класу точності (наприклад, 1), коли нормуюче значення відповідає довжині шкали	
E-3	Позначення класу точності (наприклад, 1), коли нормуюче значення відповідає значенню, що показується	
E-10	Позначення класу точності (наприклад, 1), коли нормуюче значення відповідає інтервалу вимірювання	
F. Основні позначення (см. також [3] і [4])		
F-1	Магнітоелектричний прилад з рухомою котушкою	
F-2	Магнітоелектричний логометр (вимірювач відношень)	
F-3	Магнітоелектричний прилад з рухомих магнітом	
F-4	Магнітоелектричний логометр (вимірювач відношень) з рухомих магнітом	
F-5	Електромагнітний прилад	
F-6	Поляризований електромагнітний прилад	
F-7	Електромагнітний логометр (вимірювач відношень)	
F-8	Електродинамічний прилад без залізного осердя	
F-9	Електродинамічний прилад з залізним осердям (феродинамічний)	
F-10	Електродинамічний логометр (вимірювач відношень) без залізного осердя	
F-11	Електродинамічний (феродинамічний) логометр (вимірювач відношень) з залізним осердям	
F-12	Індукційний прилад	
F-13	Індукційний вимірювач відношень (логометр)	
F-15	Біметалевий прилад	
F-16	Електростатичний прилад	
F-17	Вібраційний прилад	










Додаток А (продовження)

F-18	Термопара (термоперетворювач) неізольована	
F-19	Ізольована термопара (термоперетворювач)	
F-20	Електронний пристрій у вимірювальному колі	
F-21	Електронний пристрій в допоміжному колі	
F-22	Випрямляч	
F-23	Шунт	
F-24	Додатковий опір	
F-25	Додаткова котушка індуктивності	
F-26	Додатковий повний опір	
F-27	Електричний екран	
F-28	Магнітний екран	
F-29	Астатичний прилад	Ast
F-30	Напруженість магнітного поля, виражена в кА/м, що визиває зміну показань, відповідну позначенню класу точності (наприклад 2 кА/м)	
F-31	Затискач «земля» (основне позначення)	 (5017) ¹⁾
F-32	Регулятор нуля (інтервалу вимірювання)	
F-33	Див. окремий документ	
F-34	Напруженість електричного поля, виражена в кВ/м, що спричиняє зміну показань, відповідну позначенню класу точності (наприклад, 10 кВ/м)	
F-35	Загальна допоміжна частина	
F-37	Феромагнітна опорна площина товщиною X мм	FeX
F-38	Феромагнітна опорна площина будь-якої товщини	Fe
Fс-39	Неферомагнітна опорна площина будь-якої товщини	Nfe
F-42	Затискач корпусу, або шасі	 (5020) ¹⁾

Додаток А (продовження)

F-43	Затискач захисного заземлення	 (5019) ¹⁾
F-44	Затискач заземлення, вільний від перешкод	 (5018) ¹⁾
F-45	Затискач сигналу низького рівня	
F-46	Позитивний затискач	 (5005) ¹⁾
F-47	Негативний затискач	 (5006) ¹⁾
F-48	Керування встановленим діапазоном опору	
F-49	Прилад має пристрій захисту від перевантажень	
F-50	Керування поверненням в вихідний стан пристрою захисту від перевантажень	
<p>¹⁾ Наведені в даній графі числа — номери позначень за [3].</p> <p>²⁾ Символи, отримані з символу 02-02-04 за [4].</p> <p>³⁾ Для інформації.</p> <p>⁴⁾ Символ E-2 — для інформації. Його не варто застосовувати в нових розробках приладів.</p> <p>⁵⁾ Якщо символи F-18, F-19, F-20, F-21 або F-22 об'єднуються з символами приладу, наприклад F-1, то пристрій є вбудованим.</p> <p>⁶⁾ Символ F-31 не рекомендується. Замість нього варто застосовувати один з більш конкретних символів F-42, F-43, F-44 або F-45.</p> <p>⁷⁾ Символ F-35 означає, що пристрій зовнішній для приладу і повинен поєднуватись з одним із символів F-18, F-19, F-20, F-21 або F-22.</p>		

**Додаток Б – СПОСОБИ ЗАСТОСУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ
ПРИЛАДІВ РІЗНИХ СИСТЕМ**

Система приладу	В яких ВП застосовується	Рід струму	Рівняння шкали	Частотний діапазон, Гц
	A, V, Ω	—	$\alpha = S \cdot I$	—
	Ω	—	$\alpha = f \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$	—
	A, V	\sim	$\alpha = \frac{1}{2 \cdot W} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2 = A \cdot I^2 = S \cdot I$	45-1500
	φ, Hz	\sim	$\alpha = f \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$	45-1500
	A, V, W	\sim	$\alpha = S \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \psi$	0-5000
	φ, Hz	\sim	$\alpha = S \cdot \frac{I_1 \cdot \cos \psi_1}{I_2 \cdot \cos \psi_2}$	0-5000
	A, V, W	\sim	$\alpha = S \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \psi$	0-5000
	kWh	\sim	$\alpha = S \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \psi$	50
	V	\sim	$\alpha = \frac{1}{2 \cdot W} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 = S \cdot U$	0-10 ⁷

Навчальне видання

ТУГАЙ Дмитро Васильович

Текст лекцій

з дисципліни

«Основи метрології та електричних вимірювань»

(для студентів усіх форм навчання
напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка»)

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

Редактор *С. В. Тимошук*

Комп'ютерне верстання *Д. В. Тугай*

План 2011, поз. 137Л

Підп. до друку 14.04.2011 р.

Формат 60×84/16

Друк на ризографі.

Ум.-друк. арк. 5,3

Зам. №

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rektorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.