

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА



ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(для здобувачів першого (бакалаврського)

рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2024

УДК621.3

Тугай Д. В. Основи метрології та електричних вимірювань : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Д. В. Тугай, О. Б. Єгоров, С. І. Корнелюк, Я. Б. Форкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 155 с.

Автори:

д-р техн. наук, проф. Д. В. Тугай,
канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,
асист. С. І. Корнелюк,
канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 13 від 20.06.2024

© Д. В. Тугай, О. Б. Єгоров, С. І. Корнелюк, Я. Б. Форкун

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 7 |
| ТЕМА 1 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ В МЕТРОЛОГІЇ | 10 |
| 1.1 Основні метрологічні визначення. Одиниці фізичних величин. Засоби вимірів та їхня класифікація..... | 10 |
| 1.2 Класифікація вимірювань | 12 |
| ТЕМА 2 КЛАСИФІКАЦІЯ ПОХИБОК І КЛАСИ ТОЧНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ | 14 |
| 2.1 Похибки засобів вимірювань..... | 18 |
| 2.2 Похибки електровимірювальних приладів | 18 |
| 2.3 Характеристики електровимірювальних приладів | 21 |
| ТЕМА 3 МІРИ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН..... | 24 |
| 3.1 Міри фізичних величин..... | 24 |
| ТЕМА 4 ШУНТИ І ДОДАТКОВІ ОПОРИ | 25 |
| 4.1 Шунти | 25 |
| 4.2 Додаткові резистори | 27 |
| ТЕМА 5 ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ..... | 30 |
| 5.1 Трансформатори струму і напруги..... | 30 |
| ТЕМА 6 АНАЛОГОВІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПРИЛАДИ | 38 |
| 6.1 Загальні відомості про аналогові вимірювальні прилади | 38 |
| 6.2 Технічні вимоги..... | 39 |
| 6.3 Відлікові пристрої | 41 |
| 6.4 Пристрої для створення протидіючого моменту | 44 |
| 6.5 Пристрої для створення заспокійливого моменту..... | 46 |
| ТЕМА 7 ЕЛЕКТРОННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ..... | 48 |
| 7.1 Прилади магнітоелектричної системи | 48 |

| | | |
|--|---|-----|
| 7.2 | Гальванометри магнітоелектричної системи | 50 |
| 7.3 | Логометр магнітоелектричної системи | 51 |
| 7.4 | Прилади електромагнітної системи | 52 |
| 7.5 | Логометр електромагнітної системи | 55 |
| 7.6 | Електродинамічні прилади | 56 |
| 7.7 | Електродинамічний логометр..... | 61 |
| 7.8 | Феродинамічні прилади..... | 62 |
| 7.9 | Прилади індукційної системи..... | 64 |
| 7.10 | Електростатичні прилади..... | 66 |
| 7.11 | Електронні перетворювачі..... | 68 |
| 7.12 | Електронні вольтметри | 69 |
| 7.13 | Електронно-променевий осцилограф..... | 72 |
| ТЕМА 8 ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ | | 75 |
| 8.1 | Цифрові вольтметри постійного та змінного струму..... | 77 |
| 8.2 | Цифрові осцилографи | 80 |
| ТЕМА 9 ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН | | 83 |
| 9.1 | Вимірювання активної електричної енергії..... | 83 |
| 9.2 | Вимірювання реактивної електричної енергії | 89 |
| ТЕМА 10 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ | | 90 |
| 10.1 | Прямі методи вимірювань активних опорів | 90 |
| 10.2 | Вимірювання опору мостом постійного струму..... | 91 |
| 10.3 | Вимірювання опору омметром..... | 96 |
| 10.4 | Вимірювання опору мегомметром | 99 |
| 10.5 | Вимірювання ємності та індуктивності прямими методами | 101 |
| 10.5.1 | Вимірювання мостом змінного струму..... | 101 |

| | | |
|--|--|-----|
| 10.5.2 | Вимірювання ємності фарадметром..... | 103 |
| 10.5.3 | Вимірювання ємності балістичним гальванометром і вольтметром | 104 |
| ТЕМА 11 ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ... | | 105 |
| 11.1 | Вимірювання потужності в колах постійного струму..... | 106 |
| 11.2 | Вимірювання потужності в колах змінного струму..... | 109 |
| 11.2.1 | Вимірювання активної потужності в однофазному колі змінного струму..... | 109 |
| 11.2.2 | Вимірювання реактивної потужності в однофазних колах змінного струму..... | 111 |
| 11.2.3 | Вимірювання активної потужності в трифазних трипровідних колах змінного струму..... | 112 |
| 11.2.4 | Вимірювання активної потужності в трифазних чотирипровідних колах змінного струму..... | 115 |
| 11.2.5 | Вимірювання реактивної потужності в трифазному колі змінного струму..... | 115 |
| ТЕМА 12 ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ, КУТА ЗСУВУ ФАЗ ТА ЧАСТОТИ..... | | 118 |
| ТЕМА 13 ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН..... | | 124 |
| 13.1 | Вимірювання магнітного потоку в постійному магнітному полі..... | 125 |
| 13.1.1 | Вимірювання за допомогою балістичного гальванометра (індукційно-імпульсний метод)..... | 125 |
| 13.1.2 | Вимірювання магнітного потоку веберметром..... | 127 |
| 13.2 | Вимірювання магнітної індукції й напруженості магнітного поля..... | 127 |
| 13.2.1 | Індукційно-імпульсний метод..... | 127 |
| 13.2.2 | Явище ядерного магнітного резонансу..... | 129 |
| 13.2.3 | Ефект Холу..... | 130 |

| | |
|---|-----|
| ТЕМА 14 ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН | 132 |
| 14.1 Класифікація неелектричних величин і вимірювальних перетворювачів ... | 132 |
| 14.2 Спряження первинних перетворювачів з електричними засобами вимірювань | 136 |
| 14.3 Вимірювання світлових величин | 138 |
| 14.4 Вимірювання сили світла | 139 |
| 14.5 Вимірювання світлового потоку | 141 |
| 14.6 Вимірювання освітленості | 143 |
| 14.7 Вимірювання яскравості | 144 |
| СПИСОК ДЖЕРЕЛ | 147 |
| ДОДАТОК А | 149 |
| ДОДАТОК Б | 154 |

ВСТУП

Розвиток науки і техніки завжди був пов'язаний з прогресом у сфері вимірювань. У фізиці, механіці й 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 мірі, у якій її можна виміряти».

Кожному новому відкриттю у сфері 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 у 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 XIX 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 XIX та на початку XX століття видатний російський електротехнік М. О. Доливо-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 низку приладів для вимірювання опору електричного кола, зроблені перші кроки у сфері забезпечення єдності в вимірюваннях електричних величин. Річ у тому, що до 1880 року на практиці використовувалось 15 різних одиниць електричного опору, 8 одиниць ЕРС,

5 одиниць електричного струму. Такий стан сильно ускладнював 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 низки технологічних завдань.

Новим кроком у розвитку електровимірювальної техніки стала розробка і освоєння серійного випуску цифрових вимірювальних приладів (далі – 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 низка інших цінних ознак характерні для ЦВП поряд із повною автоматизацією процесу вимірювання. Під час розроблення 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 із вибором засобів і методів вимірювань електричних, магнітних та неелектричних величин, а також для вивчення інших дисциплін спеціальності, у 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, їхнього застосування під час проведення електротехнічних вимірювань та обробка результатів вимірювань.

ТЕМА 1 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ В МЕТРОЛОГІЇ

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

Наука про виміри, методи і засоби забезпечення їхньої 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. У таблиці 1.1 наведені найбільш уживані похідні одиниці електричних і магнітних величин.

Таблиця 1.1 – Похідні одиниці електричних і магнітних величин

| Величина | Пояснення | Позначення | | Вираження |
|--|---------------|------------|------|-----------|
| | | Укр. | Між. | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 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 |

Продовження таблиці 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------------------|---------------------|-----|-----|-------------------|
| Електрична ємність | фарада | Ф | F | Кл/В |
| Потік магнітної індукції | вебер | Вб | Wb | В·с |
| Індуктивність і взаємна індуктивність | генрі | Гн | Н | Вб/А |
| Магнітна індукція | тесла | Тл | Т | Вб/м ² |
| Напруженість магнітного поля | ампер на метр | А/м | А/м | – |
| Магніторушійна сила | ампер | А | А | – |
| 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-(10¹), гекто-(10²), кіло-(10³), мега-(10⁶), гіга-(10⁹), тера-(10¹²).

Засобами електричних вимірів називають технічні засоби, які використовують під час електричних вимірів і які мають нормовані похибки. Розрізняють такі 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 становить спеціально підібраний комплект мір для відтворення ряду однойменних величин різного розміру. Прикладами набору мір є магазини опорів, ємностей тощо.

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 слугують 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 низці 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 поділяються 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 зворотного 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 шляхом 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 слугувати вимірювання електричного опору за допомогою врівноваженого мосту.

Диференціальний метод – це метод порівняння з мірою, за яким прилад вимірює 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 бути 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 заміщується 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 бути вимір опору з почерговим включенням вимірюваного опору та регульованого зразкового опору в те ж саме плече мосту.

ТЕМА 2 КЛАСИФІКАЦІЯ ПОХИБОК І КЛАСИ ТОЧНОСТІ ЗАСОБІВ 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 :

$$\Delta A = A - A_0. \quad (2.1)$$

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

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100. \quad (2.2)$$

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 низці випадків враховують похибки засобів вимірювання шляхом введення поправок. Поправкою називається абсолютна похибка, що береться зі зворотним знаком.

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

Абсолютна похибка вимірювання

$$\Delta I = I - I_0 = 49,9 - 50,0 = -0,1A.$$

Відносна похибка вимірювання

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

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

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 бути 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:

$$A_{cp} = (a_1 + a_2 + \dots + a_n) / n, \quad (2.3)$$

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:

$$\rho(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/2\sigma^2}, \quad (2.4)$$

де $\rho(\delta)$ – щільність ймовірності випадкової похибки δ ;

σ – середнє квадратичне відхилення.

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_n^2}{n-1}}, \quad (2.5)$$

де $\rho_1 = a_1 - A_{cp}$;

$\rho_2 = a_2 - A_{cp}$;

$\rho_n = a_n - A_{cp}$.

Характер кривих, що описує рівняння (2.5) для двох значень σ , показаний на рисунку 2.1.

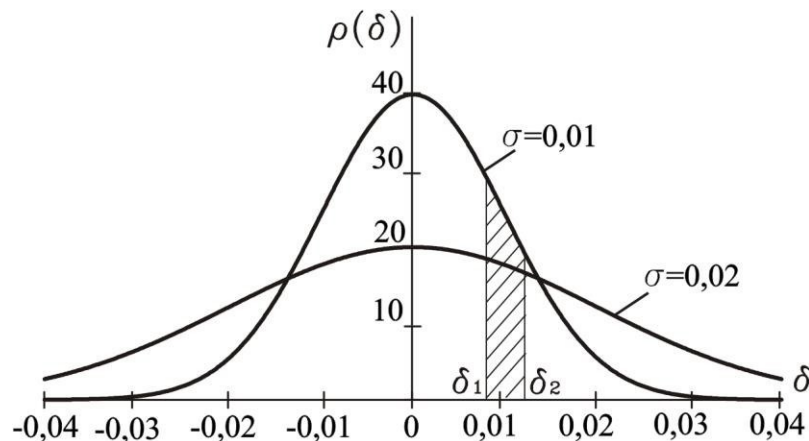


Рисунок 2.1 – Нормальний закон розподілу випадкових похибок

Із цих кривих видно, що чим менше σ , тим частіше зустрічаються малі випадкові похибки, тобто тим точніше виконані вимірювання.

2.1 Похибки засобів вимірювань

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

1. *Статичну похибку*, яка виникає при вимірюванні сталої в часі величини.

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

Залежно від умов виникнення похибок розрізняють:

1. *Основну похибку* – похибку засобів вимірювань, що використовуються у нормальних умовах, тобто при нормальному положенні, температурі навколишнього середовища $20 + 5$ °С, відсутності зовнішнього електричного і магнітного полів, крім земного тощо.

2. *Додаткову похибку* – похибку засобів вимірювань, що виникає в результаті відхилення значення однієї з впливових 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.

2.2 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_0 вимірюваної величини, тобто:

$$\Delta = x - x_0. \quad (2.6)$$

Відносна похибка приладу δ становить відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини. Відносна похибка зазвичай виражається у відсотках і дорівнює:

$$\delta = \frac{x - x_0}{x_0} \cdot 100 = \frac{\Delta}{x_0} \cdot 100. \quad (2.7)$$

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

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_n} \cdot 100. \quad (2.8)$$

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 впливових величин і внаслідок старіння (рис. 2.2). Тому значення абсолютної похибки зазвичай обмежене двома прямими (1), симетричними щодо осі абсцис, відстань між якими збільшується із зростанням вимірюваної величини (рис. 2.2).

Граничні значення абсолютних похибок Δ_{\max} можуть бути як додатними, так і від'ємними, але однаковими за модулем. Їхня 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,

$$|\Delta_{\max}| = |a| + |b \cdot x|, \quad (2.9)$$

де a називають граничним значенням *адитивної похибки*,

$b \cdot x$ – граничним значенням *мультиплікативної похибки*.

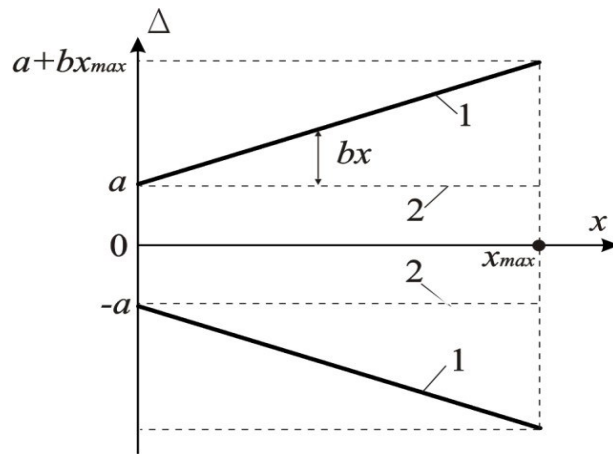


Рисунок 2.2 – Залежність абсолютної похибки приладу від вимірюваної величини

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 виміряне 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. 2.2). 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: 1×10^n ; $1,5 \times 10^n$; 2×10^n ; $2,5 \times 10^n$; 4×10^n ; 5×10^n ; 6×10^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:

$$|\delta_{\max}| = [c + d(|x_k / x|) - 1], \quad (2.10)$$

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.

2.3 Характеристики електровимірювальних приладів

Загальними характеристиками електровимірювальних приладів є їхні *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 за тих самих умов виміру тієї ж величини.

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

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

$$S = \frac{da}{dx} = F(x). \quad (2.11)$$

Переміщення покажчика a , що виражається в поділках або міліметрах шкали, для великої групи приладів визначається насамперед 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, зворотна 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.

Під час введення електровимірювального приладу в коло, що перебуває під напругою, прилад споживає від цього кола деяку *потужність*. У більшості випадків ця потужність мала з погляду 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} Вт 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 покажчика 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 їхню 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 спостерігається 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 за дотримання 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.

ТЕМА 3 МІРИ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

3.1 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 як робочі еталони 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.

ТЕМА 4 ШУНТИ І ДОДАТКОВІ ОПОРИ

4.1 Шунти

Шунт є найпростішим вимірювальним перетворювачем струму в напругу. Він становить резистор, що має чотири затискачі. Два вхідних затискачі, до яких підводить струм I , називаються *струмовими* (затискачі A , B на рисунку 4.1), а два вихідних затискачі, з яких знімається напруга U , називаються *потенційними* (затискачі B , Γ на рисунку 4.1). До потенційних затискачів приєднують вимірювальний механізм (ВМ) приладу.

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

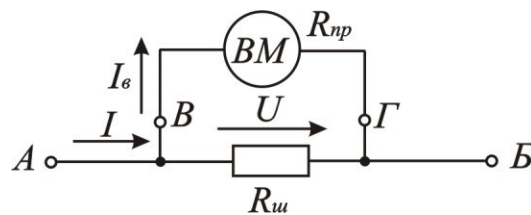


Рисунок 4.1 – Схема з'єднання вимірювального механізму із шунтом

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 переважно у колах постійного струму з магнітоелектричними вимірювальними механізмами.

На рисунку 4.1 наведена схема включення магнітоелектричного механізму ВМ із шунтом. Струм $I_в$, що протікає через вимірювальний механізм, пов'язаний з вимірюваним струмом I залежністю

$$I_в = \frac{I \cdot R_{ш}}{R_{ш} + R_{шп}}, \quad (4.1)$$

де R_{np} – опір вимірювального механізму.

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

$$R_{ш} = \frac{R_{np}}{p-1}, \quad (4.2)$$

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

Шунти виготовляють із манганіну. Якщо шунт розрахований на невеликий струм (до 30 А), то його зазвичай 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 рисунку 4.2 показаний зовнішній шунт на 2 000 А. Він має масивні наконечники з міді, які слугують для відводу тепла від манганінових пластин, що впаяні між ними. Затискачі шунта A і B – струмові, B і Γ – потенційні.

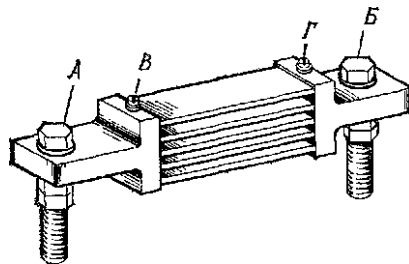


Рисунок 4.2 – Зовнішній шунт

Вимірювальний механізм приєднують до потенційних затискачів B і Γ , між якими й зосереджений опір шунта. За такого включення 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 мВ, 15 мВ, 30 мВ, 50 мВ, 60 мВ, 75 мВ, 100 мВ, 150 мВ і 300 мВ.

Для переносних магнітоелектричних приладів на струми до 30 А внутрішні шунти виготовляють на кілька границь виміру. На рисунку 4.3 показані схеми багатограничних шунтів. Багатограничний шунт складається з декількох резисторів, які можна переключати залежно від межі вимірювання важільним перемикачем (рис. 4.3, а) або шляхом переносу дроту з одного затискача на іншій (рис. 4.3, 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 5 000 А. Для виміру струмів понад 5 000 А допускається паралельне з'єднання шунтів.

4.2 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 слугують 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.

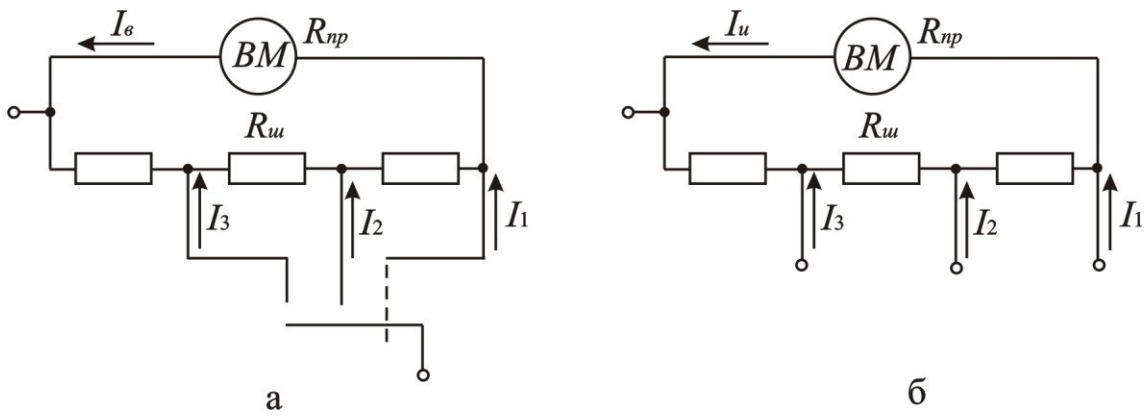


Рисунок 4.3 – Схеми багатограничних шунтів:

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

Додатковий резистор включають послідовно з вимірювальним механізмом (рис. 4.4). Струм I_6 в колі, що складається з вимірювального механізму з опором R_{np} і додаткового резистора з опором R_δ , складатиме:

$$I_6 = \frac{U}{R_{np} + R_\delta}, \quad (4.3)$$

де U – вимірювана напруга.

Якщо вольтметр має межу виміру U_H , а опір вимірювального механізму R_{np} , і за допомогою додаткового резистора R_δ потрібно розширити межу виміру в p разів, то, з огляду на сталість струму I_6 , що протікає через вимірювальний механізм вольтметра, можна записати:

$$\frac{U_H}{R_{np}} = \frac{p \cdot U_H}{R_{np} + R_\delta}. \quad (4.4)$$

звідси

$$R_\delta = R_{np} \cdot (p - 1). \quad (4.5)$$

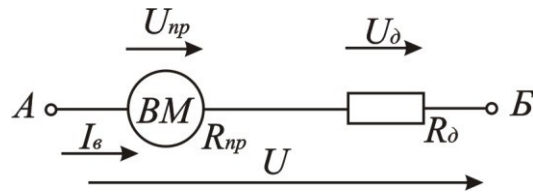


Рисунок 4.4 – Схема включення вимірювального механізму з додатковим резистором

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 їхня 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. 4.4) дорівнює:

$$\beta = \frac{\beta_\epsilon \cdot R_{np} + \beta_\delta \cdot R_\delta}{R_{np} + R_\delta}. \quad (4.6)$$

Звичайно, $\beta_\delta = 0$, тоді

$$\beta = \beta_\epsilon \cdot \frac{R_{np}}{R_{np} + R_\delta}. \quad (4.7)$$

У переносних приладах додаткові резистори виготовляються секційними на кілька меж вимірювання (рис. 4.5).

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 градуювався. Калібрований резистор може застосовуватися з будь-яким приладом, номінальний струм якого дорівнює номінальному струму додаткового резистора.

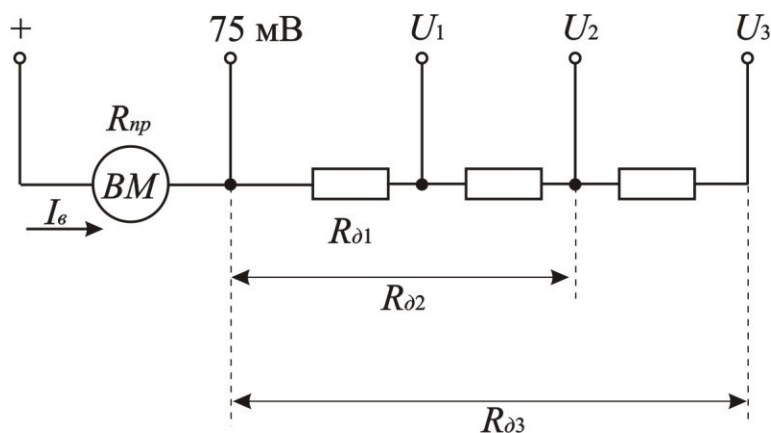


Рисунок 4.5 – Схема багатограничного вольтметра

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 мА до 30 мА.

Додаткові резистори застосовуються для перетворення напруг до 30 кВ.

ТЕМА 5 ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

5.1 Трансформатори струму і напруги

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. 5.1).

При вимірах у високовольтних колах трансформатори забезпечують безпеку обслуговування приладів, приєднаних до вторинних обмоток. Це досягається завдяки електричній ізоляції (гальванічного розділення) первинної й вторинної обмоток трансформаторів і заземлення металевого корпусу та вторинної обмотки. За відсутності заземлення й ушкодженні ізоляції між обмотками вторинна обмотка і підключені до неї прилади опиняться під високим потенціалом, що неприпустимо.

У трансформаторах струму зазвичай первинний струм I_1 більше вторинного I_2 . Первинна обмотка виконується із дроту різного сичення 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 сичення. Відповідно до ГОСТ 7746-78Е вторинний номінальний струм I_{2H} може бути 1 А; 2 А; 2,5 А; 5 А при значеннях I_{1H} у межах від 0,8 А до 40 000 А.

У 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} , у стаціонарних трансформаторах становить 100 і $100/\sqrt{3}$ В. При первинній номінальній напрузі U_{1H} до 1 150 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. 5.1). 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 потрібно помножити на дійсні коефіцієнти трансформації K_I і K_U . Для трансформатора струму $K_I = I_1 / I_2$. Для трансформатора напруги $K_U = U_1 / U_2$.

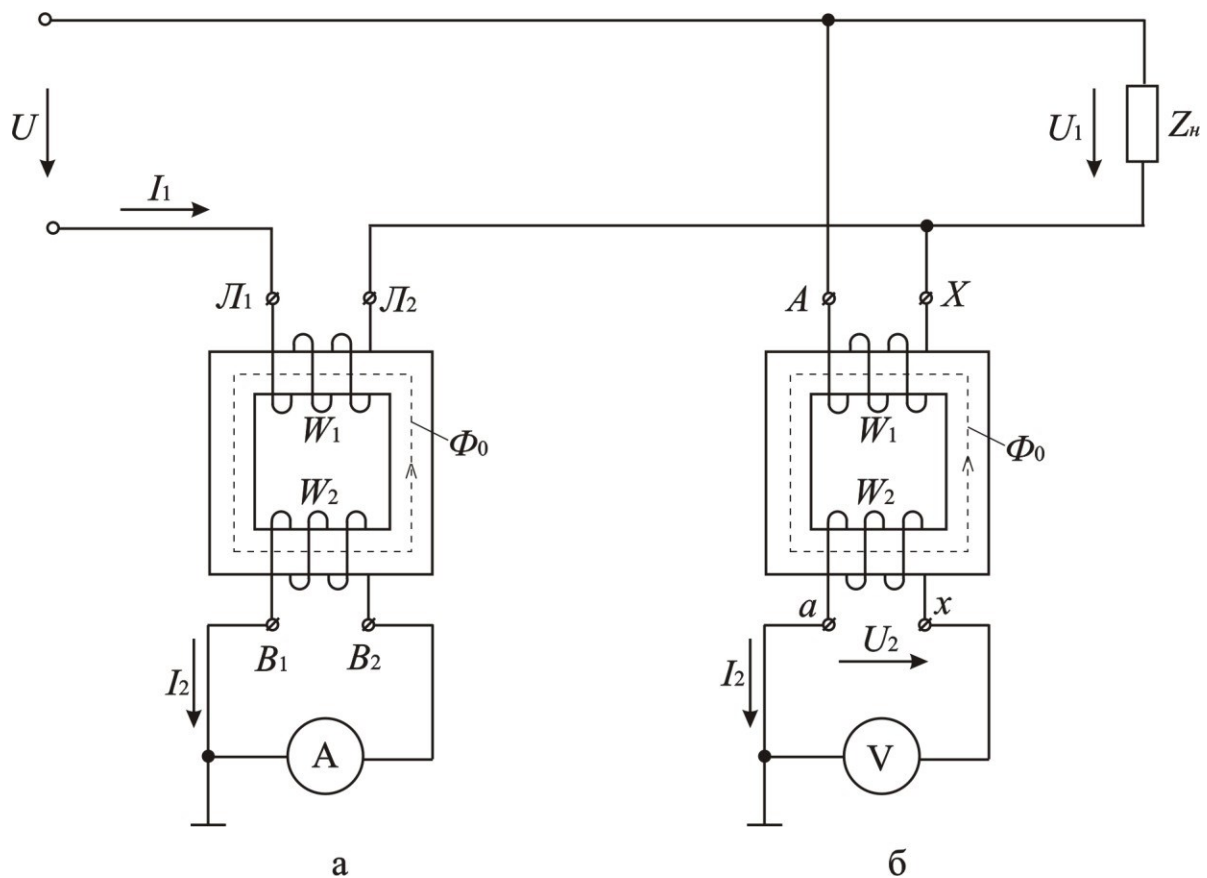


Рисунок 5.1 – Схеми включення вимірювальних трансформаторів:

а – трансформатора струму; б – трансформатора напруги

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

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

– для трансформатора струму:

$$\delta_I = \frac{I'_1 - I_1}{I_1} \cdot 100 = \frac{K_{IH} - K_I}{K_I} \cdot 100, \quad (5.1)$$

де $I'_1 = K_{IH} \cdot I_2$; $I_1 = K_I \cdot I_2$

– для трансформатора напруги:

$$\delta_U = \frac{U'_1 - U_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{K_{UH} - K_U}{K_U} \cdot 100, \quad (5.2)$$

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 $\underline{Z} = R + jX$ 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 пермалою. 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, за якого матеріал магнітопроводу має найбільшу магнітну проникність. Це призводить до відносного зменшення намагнічувального струму I_0 .

Практично компенсація підмагнічуванням здійснюється вторинним струмом під час проходження його по додаткових обмотках або підмагнічуванням завдяки потокам розсіювання. Такі трансформатори називаються *компенсованими*.

В установках з великими струмами короткого замикання за недостатньо надійної 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 розподільних пристроїв, станцій і підстанцій та в закритих приміщеннях, і переносними – для використання в лабораторіях. Стаціонарні трансформатори зазвичай 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 А; 1,0 А; 2,0 А; 5,0 А; 10,0 А; 20,0 А 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 ВА до 1 200 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 поділяються 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 достатньо громіздкими і дорогими. Перевагою трансформаторів постійного струму є безпека їхнього 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 рисунку 5.2 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 пермалою). 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 слугує 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.

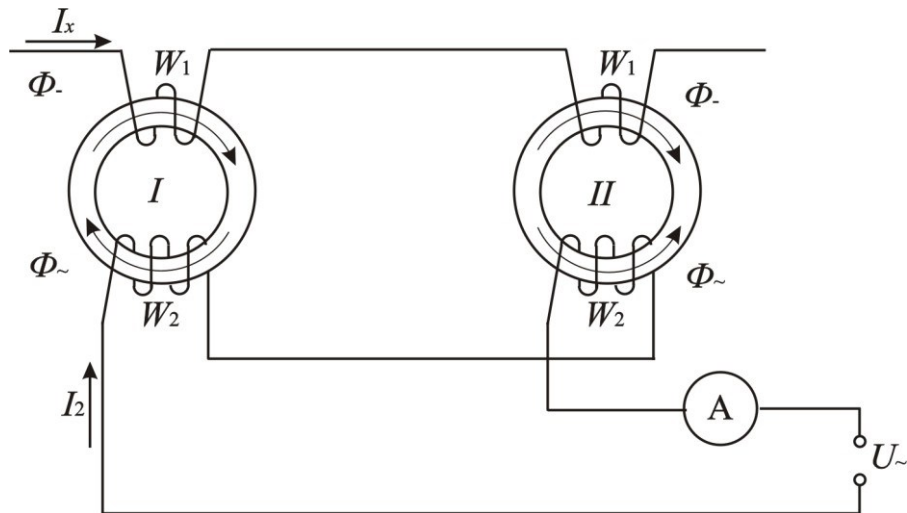


Рисунок 5.2 – Принципова схема вимірювального трансформатора постійного струму

Вимірюваний струм I_x , протікаючи по первинній обмотці, створює в обох магнітопроводах однаково спрямовані та рівні магнітні потоки Φ_{\sim} . Нехай у цей момент часу змінний струм I_2 , що протікає по обмотках W_2 , має такий напрямок, що потік Φ_{\sim} у магнітопроводі I , створений МДС $I_2 W_2$, збігається за напрямом з потоком Φ_{\sim} , тоді в магнітопроводі II ці потоки будуть спрямовані в протилежні боки, 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 достатньо велика, то форма кривої струму I_2 дуже близька до прямокутної і максимальне його значення майже не залежить від напруги й частоти джерела живлення. За прямокутної форми кривої струму I_2 його середнє значення дорівнює максимуму. Середнє значення струму вимірюють амперметром випрямної системи.

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

ТЕМА 6 АНАЛОГОВІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПРИЛАДИ

6.1 Загальні відомості про аналогові вимірювальні прилади

Аналоговими вимірювальними приладами називають прилади, показання яких є неперервною функцією змін вимірюваної величини. Аналоговий електровимірювальний прилад – це передусім показувальний 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 обертового моменту. Значення обертового 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 показчика 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.

6.2 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. Наприклад, ДСТ 8711-93(2002) для амперметрів і вольтметрів встановлює такі 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 цього 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 певного 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. Наприклад, для амперметрів класів точності 0,5–5,0 передбачена можливість перевантаження струмом, рівним $10 \cdot I_N$, протягом 0,5 с.

Для всіх приладів за значеннями впливових 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). Зокрема, четверта група засобів вимірювання має такі кліматичні робочі умови застосування: нижнє значення температури

навколишнього повітря $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, верхнє $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, найбільша відносна вологість повітря 90 % за температури $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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.

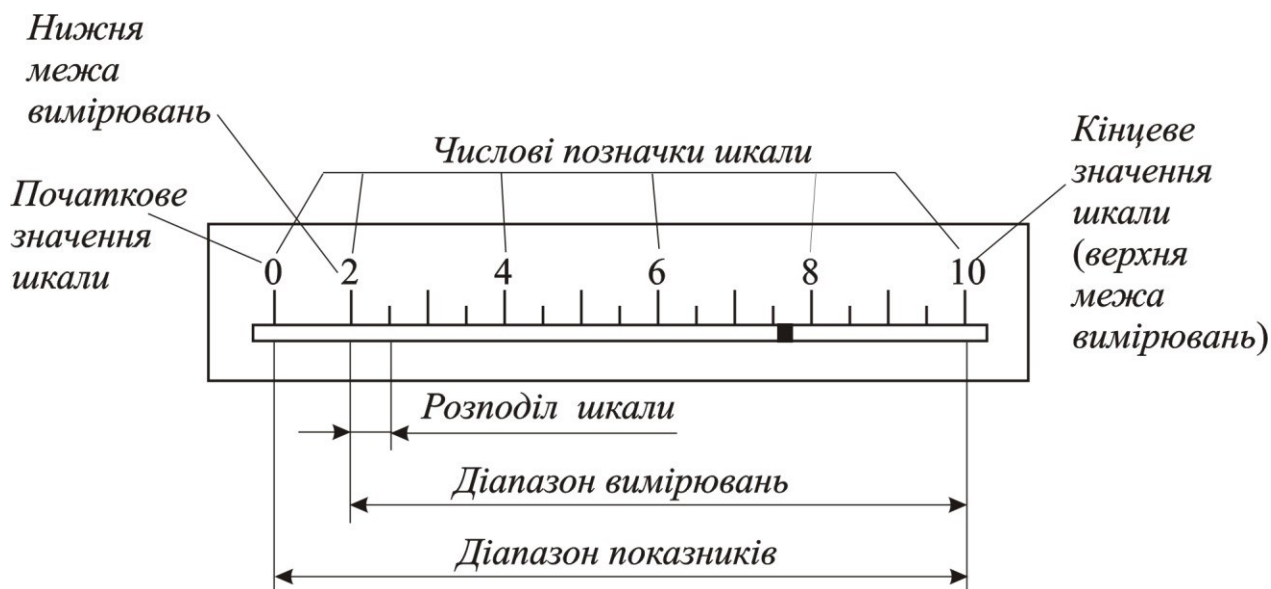
6.3 Відлікові пристрої

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. 6.1) 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 рисунку 6.1 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 рисунку 6.1 зображена нерівномірна шкала. Найменше значення вимірюваної величини, зазначене на шкалі, називається *початковим значенням шкали* x_n . У нашому випадку (рис. 6.1) $x_n = 0$. Найбільше значення вимірюваної величини, зазначене на шкалі, називають *кінцевим значенням шкали* x_k . Для шкали, зображеної на рисунку 6.1, $x_k = 10$. 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 за рівномірної шкали діапазон вимірювань і діапазон показників збігаються.

Однак за нерівномірної шкали діапазон показників не збігається з діапазоном вимірювань. Для визначення діапазону вимірювань на шкалах таких приладів зазвичай 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 рисунку 6.1, діапазон вимірювань дорівнює 2–10.



Рисунк 6.1 – 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, створюваний 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. 6.1). 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 вказувальної частини стрілки біля шкали приладу. Форма вказувальної частини стрілки повинна забезпечувати відлік показників із необхідною точністю.

Залежно від форми вказувальної частини стрілок, найпоширенішими стрілками є клиноподібні (рис. 6.2, а), ножові (рис. 6.2, б) і стрижневі (рис. 6.2, в).

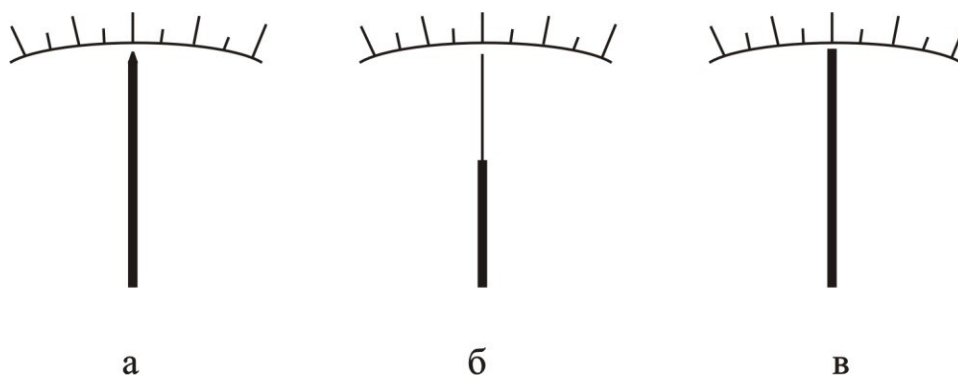


Рисунок 6.2 – Відлікові пристрої стрілочних приладів:

а – із клиноподібною стрілкою; б – із ножовою стрілкою;

в – зі стрижневою стрілкою

У лабораторних приладах підвищених класів точності за використання показників 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. 6.3).

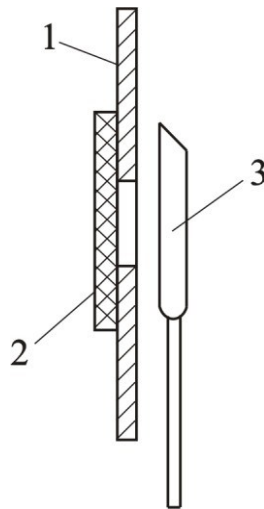


Рисунок 6.3 – Відліковий пристрій із дзеркальною шкалою

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.

6.4 Пристрої для створення протидіючого моменту

Протидіючий момент в аналогових вимірних приладах створюється здебільшого 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, обертовий 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 частини приладу.

Розтяжки (ДСТ 9444-74) становлять металеві стрічки шириною від 0,08 мм до 0,35 мм і товщиною від 0,01 мм до 0,04 мм. Як матеріал для виготовлення розтяжок використовують різні види бронзи, платини, а також кобальт-нікель-хромовий сплав. Звичайно, використовуються дві розтяжки, що встановлюють із двох боків рухомої частини. Таким чином, розтяжки не тільки створюють протидіючий момент під час повороту рухомої частини під дією обертового моменту, але й закріплюють (розтягують) рухому частину. При застосуванні розтяжок немає необхідності у використанні спеціальних опорних пристроїв (кернях, підп'ятниках), які потрібні під час застосування 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 покажчик вимкненого приладу на нульову позначку. Застосування розтяжок, що виготовляються на основі сучасної технології, дозволяє запобігти тертю в опорах і підвищити чутливість вимірювальних механізмів.

6.5 Пристрої для створення заспокійливого моменту

Рухома частина, а отже, і покажчик відлікового пристрою займають певне положення, що відповідає значенню вимірюваної величини тільки тоді, коли обертовий момент дорівнює моменту протидіючому. За будь-якої зміни вимірюваної величини змінюється обертовий момент i , отже, порушується рівність між значеннями обертового й протидіючого моментів. Рухома частина вимірювального механізму під дією різниці названих моментів почне переміщуватися в той або інший бік доти, доки не буде рівності між значеннями обертового 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. 6.4, а) застосовується здебільшого у приладах старих розробок, що мають рухому частину на осі із протидіючими пружинами. Він становить 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. Під час руху крила повітря переміщується з однієї частини камери в іншу, створюючи заспокійливий момент, що сприяє оптимальному заспокоєнню рухомої частини приладу.

Магнітоіндукційний заспокоювач (рис. 6.4, 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, зазвичай алюмінію.

У разі відхилення 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.

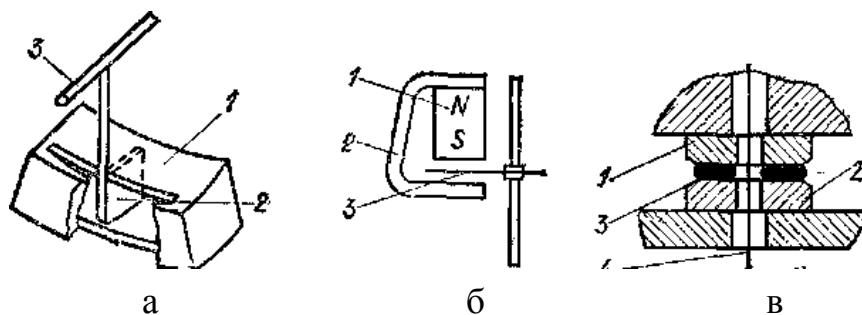


Рисунок 6.4 – Заспокоювачі: а – повітряний; б – магнітоіндукційний;
в – рідинний

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 здебільшого у приладах, що мають малі розміри за висотою, однак останнім часом його стали застосовувати й у приладах звичайного габариту. Рідинний заспокоювач (рис. 6.4, 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 мм – 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 обертовому русі диска 1 щодо диска 2, через тертя між шарами рідини виникає заспокійливий момент.

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

ТЕМА 7 ЕЛЕКТРОННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

В електромеханічних приладах енергія вимірюваної величини перетворюється в механічну.

Електромеханічний прилад містить у собі (рис. 7.1):



Рисунок 7.1 – Загальна структурна схема електромеханічного приладу

На цій схемі:

ВП – вхідний перетворювач (подільувач 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).

7.1 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. 7.2, а) і (рис. 7.2, б) відповідно.



Рисунок 7.2 – 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. 7.3):

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

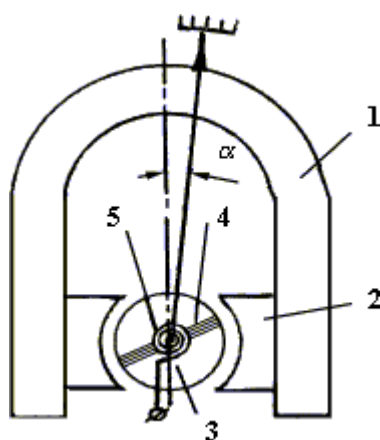


Рисунок 7.3 – Будова приладу магнітоелектричної системи

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 обертовий момент, під дією якого рамка, а разом з нею й циліндр, почнуть повертатися. Спіральні пружини створюють протидіючий момент. Якщо обертовий момент дорівнює протидіючому, то покажчик стрілки відхилиться на кут α , пропорційний сталій силі струму в рамці.

Рівняння шкали

$$\alpha = S \cdot I, \quad (7.1)$$

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 показчиків.

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, однограничні та багатограничні всіх класів точності від 0,1 і нижче.

7.2 Гальванометри магнітоелектричної системи

Гальванометром називається електровимірювальний прилад, що має високу чутливість до струму або напруги. Гальванометри широко

використовуються в електровимірвальній техніці як нуль-індикатор, а також для вимірювань малих струмів і напруг.

У гальванометрів чутливість підвищена завдяки значному зменшенню 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:

$$\alpha = S_Q \cdot I, \quad (7.2)$$

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.

7.3 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. 7.4). Живлення до котушок подається через тонкі стрічки, що не створюють протидіючого моменту. Під час протікання струмів через котушки створюються два протилежно спрямованих обертальних моменти.

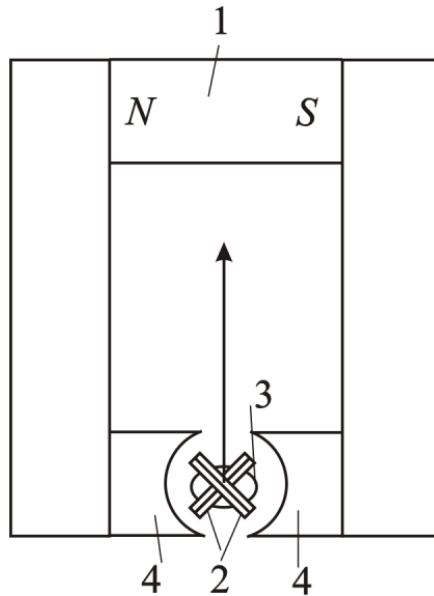


Рисунок 7.4 – Будова магнітоелектричного логометра:

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

Рівняння шкали

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \quad (7.3)$$

Кожному відношенню струмів у рамках відповідає певний кут відхилення стрілки.

Логометри магнітоелектричної системи широко використовуються для вимірювання опору (мегомметри, омметри).

7.4 Прилади електромагнітної системи

Це прилади, у яких обертальний момент виникає в результаті взаємодії поля електромагніту з феромагнітним сердечником.

Існують три конструкції електромагнітних вимірювальних механізмів: із плоскою котушкою (рис. 7.5, а), із круглою котушкою (рис. 7.5, б) і із замкнутим магнітопроводом (рис. 7.5, в). Із названих механізмів останній є найбільш досконалим.

Будова механізму із плоскою котушкою:

1 – феромагнітний 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 пермалюю;

3 – нерухомий магнітопровід;

4, 5 – полюсні наконечники.

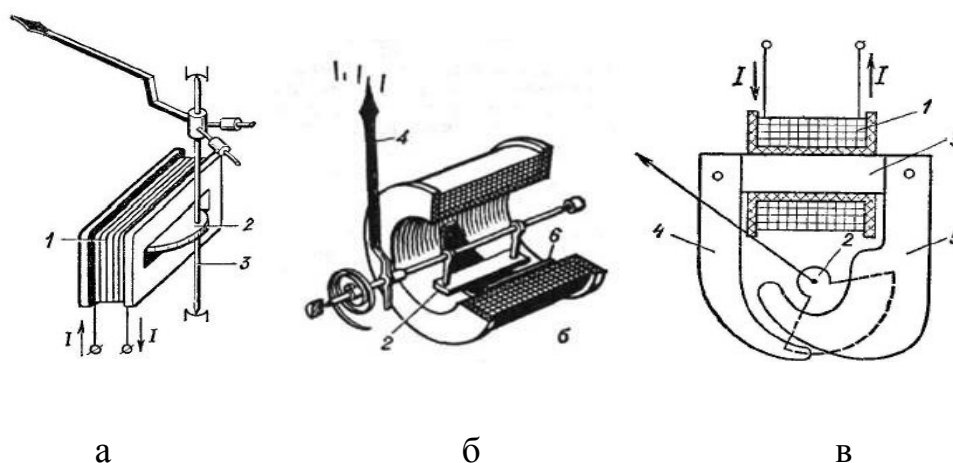


Рисунок 7.5 – Будова механізмів приладів електромагнітної системи:

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. 7.5, а). Вимірюваний струм, що

протікає через котушку I , 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. 7.5, б) або розтяжки. Для зупинення коливань рухомої частини в електромагнітних вимірювальних механізмах зазвичай використовують повітряні або рідинні заспокоювачі.

Рівняння шкали

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot W} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2 = A \cdot I^2 = S \cdot I, \quad (7.4)$$

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 10 мА до 10 А на частоти до 1 500 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 В до 600 В; щитові вольтметри класів точності 1,0; 1,5; 2,5 з верхніми межами вимірювань від 0,5 В до 600 В безпосереднього включення і до 450 кВ із трансформаторами напруги на різні фіксовані частоти від 50 Гц до 1 000 Гц.

7.5 Логометр електромагнітної системи

Широкого використання на змінному струмі набули електромагнітні логометри. Електромагнітні логометричні механізми бувають двомоментні й тримоментні.

Двомоментний логометр електромагнітної системи (рис. 7.6), 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. Обертальні моменти, що діють на сердечники, спрямовані в протилежні боки. Для статичної рівноваги, за якій обертальні моменти, створювані першою й другою котушками, рівні $M_1 = M_2$, можна записати:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{dL_1}{d\alpha} \cdot I_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL_2}{d\alpha} \cdot I_2^2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = f(\alpha), \quad (7.5)$$

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

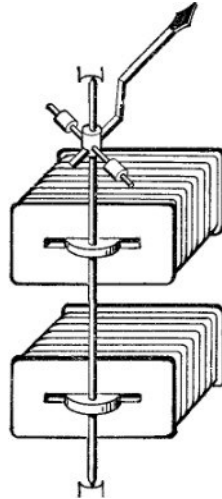


Рисунок 7.6 – Будова двоментного магнітоелектричного логометра

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

7.6 Електродинамічні прилади

Це прилади, в яких обертальний момент створюється шляхом взаємодії магнітних полів нерухомої і рухомої котушок зі струмами (рис. 7.7).

На рисунку 7.7 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.

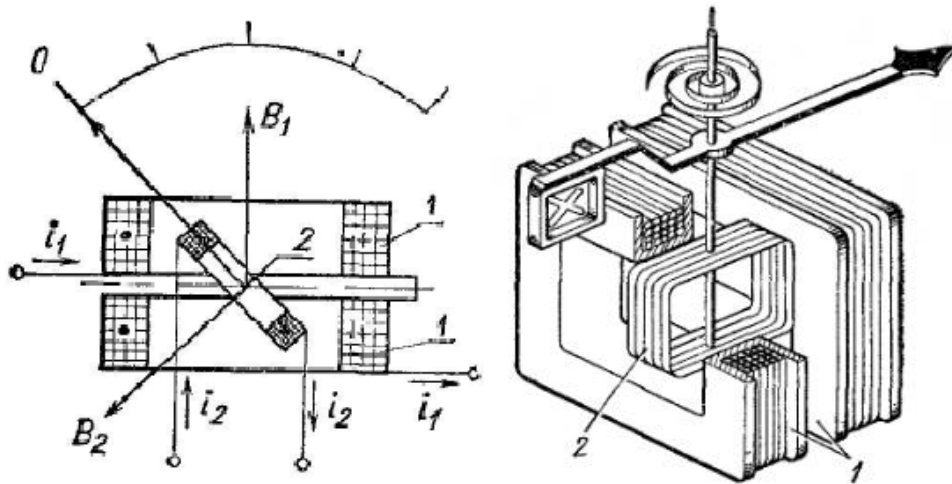


Рисунок 7.7 – Будова механізму електродинамічного приладу

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 рисунку 7.7) 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

Під час протікання струму i_1 по нерухомій котушці створюється магнітний потік, що взаємодіє зі струмом рухомої котушки. Під час протікання струму i_2 через рухома котушка в ній виникає електромагнітна сила, що діє на кожний її виток. Сили, що виникли, прагнуть повернути рухома котушка, 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

$$\alpha = \frac{1}{W} \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cdot I_1 \cdot I_2 = S \cdot I_1 \cdot I_2, \quad (7.6)$$

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

$$\alpha = \frac{1}{W} \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos\psi = S \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos\psi, \quad (7.7)$$

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

У колах змінного струму обертальний 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.

Під час вимірювання малих струмів (до 0,5 А) котушки включаються послідовно (рис. 7.8, а), при цьому $I_1 = I_2$.

Під час вимірювання великих струмів (більше 0,5 А) котушки включаються паралельно (рис. 7.8, 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.

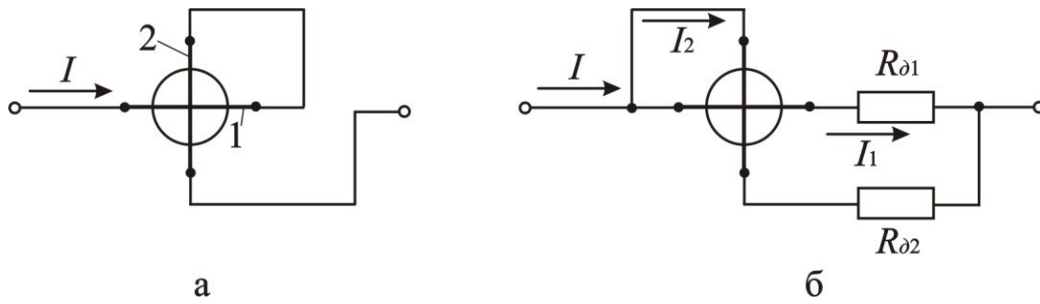


Рисунок 7.8 – Включення котушок електродинамічного приладу під час вимірювання струму

Рівняння шкали

$$\alpha = S_A \cdot I^2, \quad (7.8)$$

де S_A – чутливість амперметра струму.

2. Вимірювання напруги.

В електродинамічних вольтметрах нерухома і рухома котушки з'єднані послідовно разом із додатковим резистором (рис. 7.9). Секціонуванням додаткового резистора можна одержати різні межі вимірювання.

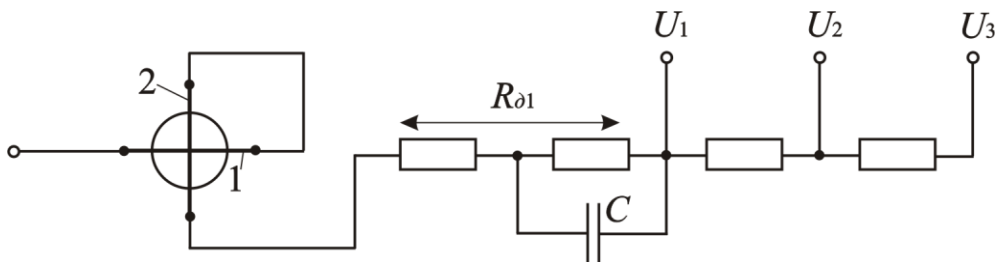


Рисунок 7.9 – Включення котушок електродинамічного приладу під час вимірювання напруги

Рівняння шкали

$$\alpha = S_V \cdot U^2, \quad (7.9)$$

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. 7.10). Для обмеження струму рухомої котушки послідовно з нею включається додатковий резистор.

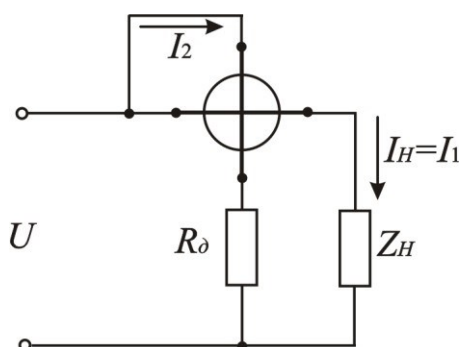


Рисунок 7.10 – Включення котушок електродинамічного приладу під час вимірювання потужності

Рівняння шкали в колі постійного струму

$$\alpha = S_p \cdot P, \quad (7.10)$$

де S_p – чутливість ватметра.

Рівняння шкали в колі змінного струму

$$\alpha = S_p \cdot P \cdot \cos \varphi, \quad (7.11)$$

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 під час вимірювання 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 їхній 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 В 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 В до 600 В.

7.7 Електродинамічний логометр

Пристрій електродинамічного логометра показаний на рисунку 7.11.

Прилад має дві рухомі й дві нерухомі котушки. Рухомі котушки закріплені на одній осі та живляться через тонкі стрічки, що не створюють протидіючого моменту. Під час роботи логометра нерухомі котушки включаються послідовно в коло з навантаженням, рухомі котушки

включаються паралельно навантаженню, але послідовно з додатковими опорами (рис. 7.11). Під час взаємодії струму нерухомих котушок I_H зі струмами рухомих котушок I_1 і I_2 створюються два обертальні моменти M_1 і M_2 .

Котушки приладу розташовують так, що за певного 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 обертального моменту доти, доки моменти не врівноважаться.

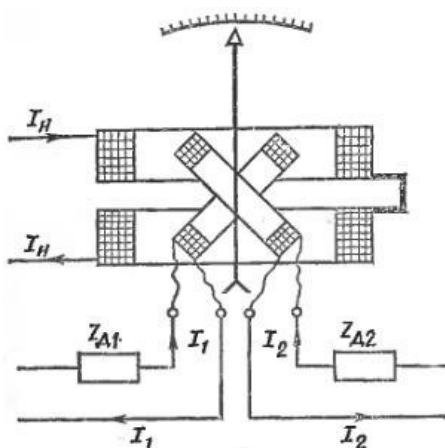


Рисунок 7.11 – Будова електродинамічного логометра

Рівняння шкали

$$\alpha = S \cdot \frac{I_1 \cdot \cos \psi_1}{I_2 \cdot \cos \psi_2}, \quad (7.12)$$

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

Електродинамічні логометри застосовуються під час виготовлення щитових і переносних фазометрів і частотомірів промислової частоти.

7.8 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 обертального моменту на осі рухомої котушки. Рухома система разом зі стрілкою повертається доти, доки обертальний момент не врівноважиться протидіючим моментом.

На рисунку 7.12 зображені дві конструкції феродинамічних механізмів: з однією котушкою (рис. 7.12, а) і з двома котушками (рис. 7.12, б).

Рівняння шкали

$$\alpha = \frac{c}{W} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \psi = S \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \psi, \quad (7.13)$$

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

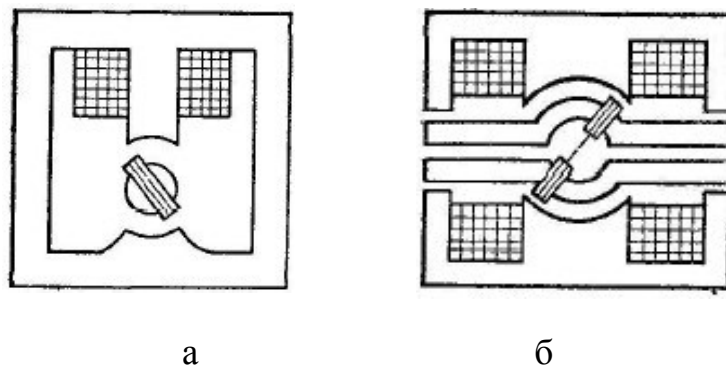


Рисунок 7.12 – Конструкції феродинамічних приладів:

а – з однією котушкою; б – з двома котушками

Переваги

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

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

Зазначені властивості феродинамічних приладів визначають галузь їхнього застосування – як щитові і переносні прилади 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.

7.9 Прилади індукційної системи

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

На рисунку 7.13 подана конструкція приладу індукційної системи: 1, 4 – два магнітопроводи: на один намотана обмотка із дроту великого січення з малою кількістю витків, а на іншій – малого січення з більшою кількістю витків; 2 – черв'як, що передає рух диска на рахунковий пристрій; 3 – рахунковий пристрій; 5 – постійний магніт (створює протидіючий момент); 6 – алюмінієвий диск.

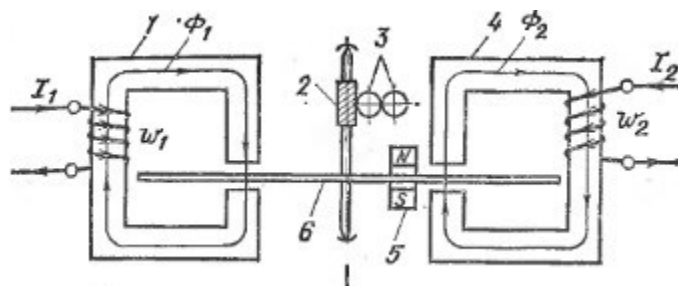


Рисунок 7.13 – Будова механізмів індукційної системи

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 із 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 обертальний момент пропорційний добутку магнітних потоків, що пронизують алюмінієвий диск і синусу кута зсуву фаз ψ між ними:

$$M_{BP} = M_{BP1} - M_{BP2} = k \cdot f \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \sin \psi, \quad (7.14)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від геометричних розмірів магнітопроводів, їхнього матеріалу і розташування, від кількості витків котушок, опору алюмінієвого диску та інших факторів;

f – частота струму.

Рівняння шкали

$$\alpha = \frac{k}{W} \cdot f \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \psi = S \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \psi. \quad (7.15)$$

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

Недоліки

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

7.10 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 шляхом 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. 7.14, а) або зміни активної площі пластин (рис. 7.14, б). Перший тип механізмів використовується для створення кіловольтметрів, а другий – для вольтметрів (у десятки й сотні вольт).

На рисунку 7.14 прийняті такі 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 рисунку 7.14, 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 обертальний момент не врівноважиться протидіючим моментом, створюваним спіральними пружинками.

Для заспокоєння рухомої частини механізму частіше застосовують магнітоіндукційні заспокоювачі.

Рівняння шкали

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot W} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 = S \cdot U, \quad (7.16)$$

де C – ємність;

S – чутливість електростатичного приладу.

Електростатичні вимірювальні механізми застосовуються у вольтметрах постійного і змінного струмів.

Розширення меж виміру на змінному струмі здійснюється шляхом включення ємнісного розділювача напруги, а на постійному – резистивного.

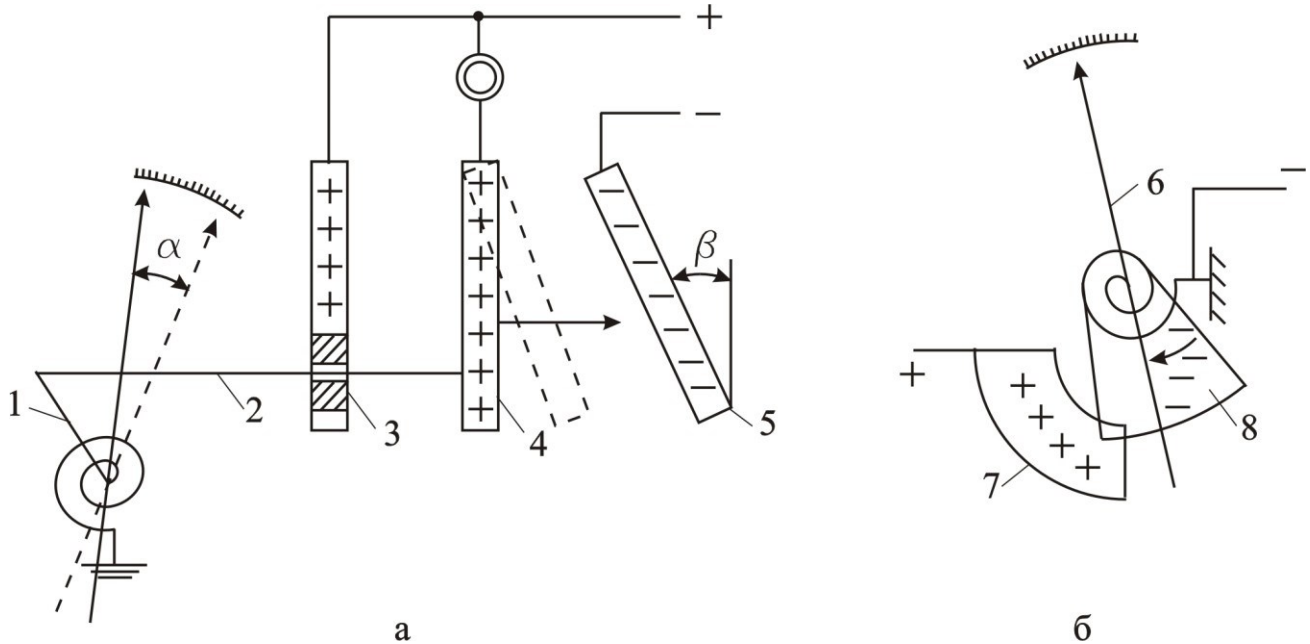


Рисунок 7.14 – Будова механізмів електростатичної системи:

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, однограничні й багатограничні 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 пФ 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.

7.11 Електронні перетворювачі

Становлять засоби вимірювань, у 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 як вихідні пристрої використовують магнітоелектричні механізми або електронно-променеві трубки.

Найбільш широко серед аналогових електронних вимірювальних приладів використовуються електронні вольтметри, осцилографи, частотоміри,

фазометри, аналізатори спектра, 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».

7.12 Електронні вольтметри

До складу електронних вольтметрів входять підсилювачі постійної та змінної напруг, перетворювачі змінної напруги в постійну (випрямлячі) і постійної в змінну (інвертори), розділювачі напруги. Як вихідні пристрої найчастіше використовується магнітоелектричний вимірювальний механізм.

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

Електронні вольтметри постійної напруги як вихідний вимірювальний механізм мають магнітоелектричні мікроамперметри зі струмом повного відхилення 50 мкА – 500 мкА й опором рамки 500 Ом – 1 000 Ом. Структурна схема електронного вольметра постійного струму подана на рисунку 7.15. Вимірювана напруга U_x подається на вхідний пристрій, що становить багатограничний високоомний розділювач на резисторах. З розділювача напруга надходить на підсилювач постійного струму й далі – на вимірювальний

механізм. Розділювач і підсилювач постійного струму доводять рівень напруги до значень, необхідних для нормальної роботи вимірювального механізму.



Рисунок 7.15 – 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 подані на рисунку 7.16.

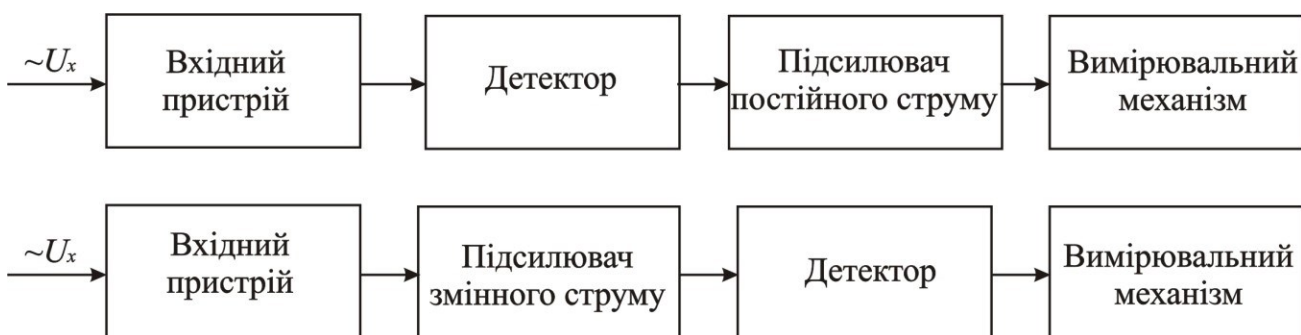


Рисунок 7.16 – Структурні схеми електронного вольтметра змінного струму

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 – 1 000 МГц), але не здатні вимірювати напруги, більші декількох десятих часток вольт. Друга схема дозволяє створювати чутливі вольтметри, нижня межа вимірювань яких становить одиниці мікровольт. 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 рисунку 7.17 як приклад подані фотографії сучасних електронних аналогових вольтметрів: мікровольтметра ВЗ-57 (рис. 7.17, а) і мілівольтметра АВМ-1071 (рис. 7.17, б).



а



б

Рисунок 7.17 – Зовнішній вигляд електронних аналогових вольтметрів:

а – мікровольтметр ВЗ-57; б – мілівольтметр АВМ-1071

Мікрровольтметр 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/27пФ, 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).

7.13 Електронно-променевий осцилограф

Електронно-променевий осцилограф – прилад, призначений для візуального спостереження електричних процесів, представлених у формі напруги, а також вимірювань параметрів сигналів, що визначають їхні 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 такі 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 менше 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, двопроменеві, прецизійні, польові. За допомогою низки осцилографів можна вимірювати частоту, струм, напругу, температуру.

Спрощена функціональна схема осцилографа подана на рисунку 7.18.

На ньому позначені:

1 – нитка розжарення;

- 2 – катод;
- 3 – модулятор (сітка) або керуючий анод;
- 4 – фокусувальний анод;
- 5 – прискорювальний анод;
- 6 – відхиляючі пластини за вертикаллю й горизонталлю;
- 7 – екран із люмінофором;
- БЖ – блок живлення;
- ПН – розділювач 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 становить скляний балон, з якого відкачане повітря, де розташовані катод, що підігрівається, модулятор, фокусувальний 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.

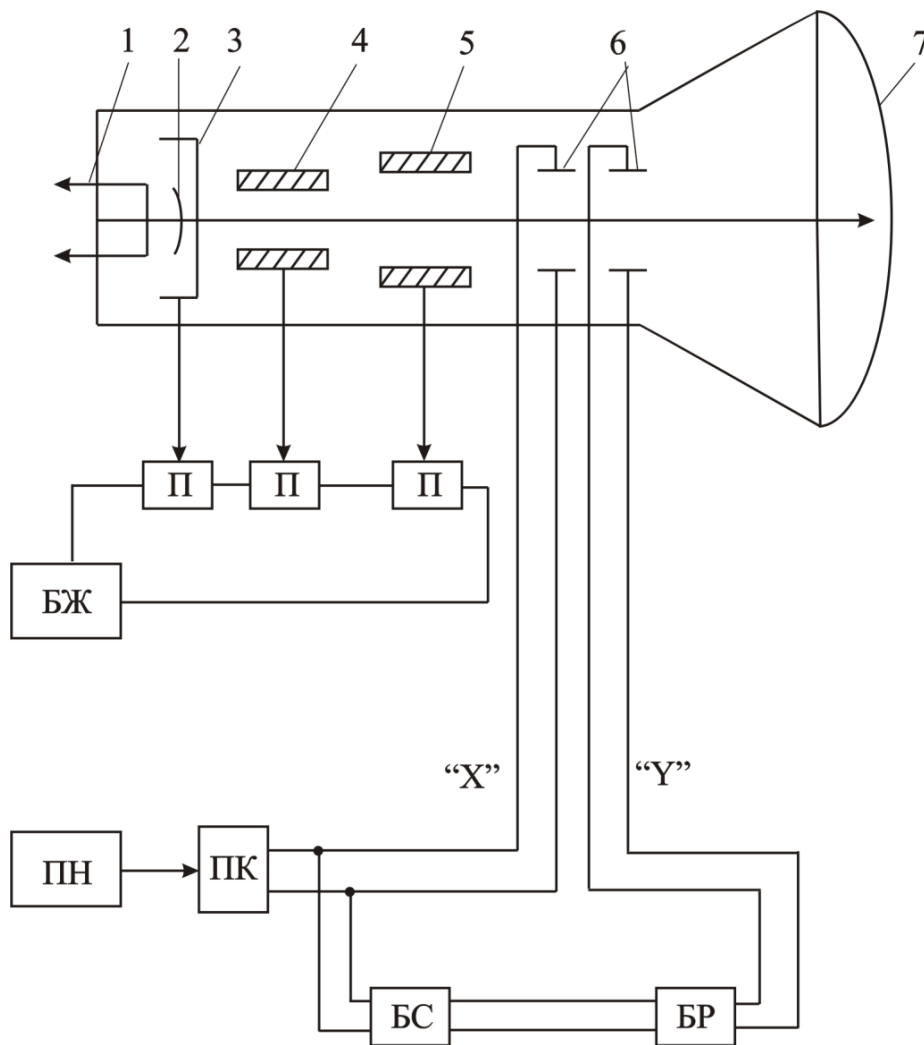


Рисунок 7.18 – Спрощена функціональна схема електронного осцилографа

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

До горизонтальних відхиляючих пластин осцилографа подаються так звана пилкоподібна напруга, отримана за допомогою блока розгортки (БР) і блока 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 осцилографів використовують також і більш складні, зокрема багатопроменеві, трубки для спостереження відразу двох і більше сигналів. На рисунку 7.19 поданий зовнішній вигляд сучасного двоканального електронного аналогового осцилографа С1-157/1.

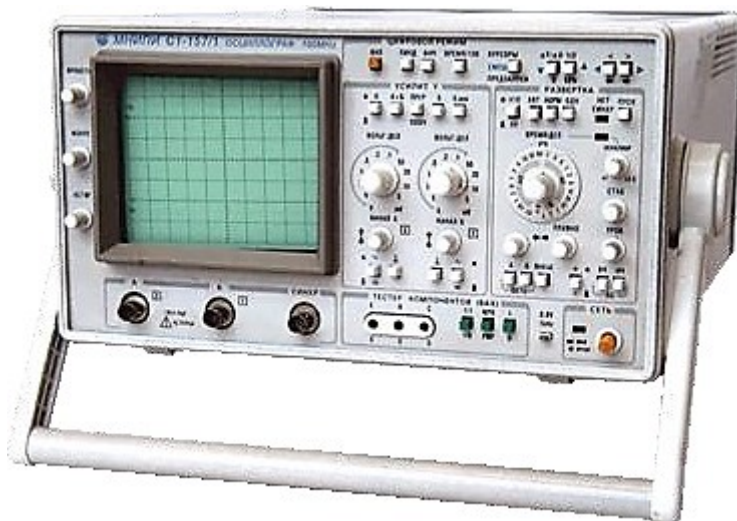


Рисунок 7.19 – Зовнішній вигляд електронного аналогового осцилографа С1-157/1

Характеристики осцилографа: смуга пропускання від 0 МГц до 100 МГц; частота дискретизації 50 МГц; розгортка від 1 мкс/поділ до 20 з/поділ; режим самописа; цифрова індикація; 5 режимів синхронізації; споживана потужність 80 ВА; похибка установки $\pm 3\%$; вхідний опір 1 МОм.

ТЕМА 8 ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Цифровий вимірювальний прилад (далі – ЦВП) – це прилад, у якому вхідний сигнал перетворюється в дискретний вихідний сигнал і представляється в цифровому вигляді. Під дискретним сигналом розуміється переривчастий сигнал, у якому інформація міститься не в інтенсивності носія

сигналу (наприклад, у значенні напруги, струму), а в числі елементів сигналу (наприклад, у числі імпульсів напруги) та їхньому 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 (далі – АЦП).

Узагальнена функціональна схема ЦВП подана на рисунку 8.1. 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* у сучасних ЦВП використовуються мікроконтролери.

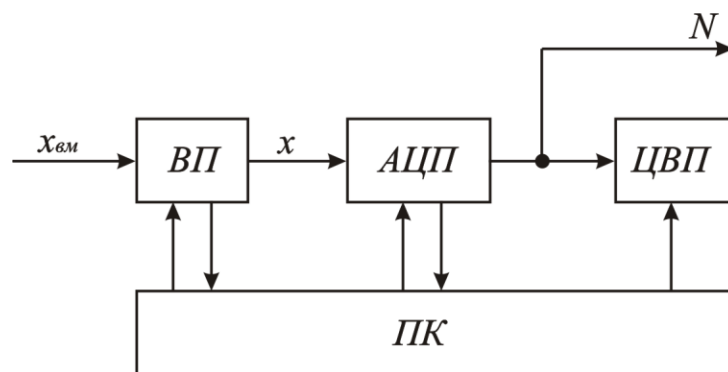


Рисунок 8.1 – Узагальнена функціональна схема ЦВП

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 поділяться 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 тощо.

8.1 Цифрові вольтметри постійного та змінного струму

Цифрові вольтметри (далі – ЦВ) постійного струму становлять найпоширенішу групу ЦВП. Вони дозволяють вимірювати напруги від 1 мкВ до 1 000 В з похибкою 0,01 % – 0,1 % при входному опорі 10^9 Ом – 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 за порівняно невисокої швидкодії мають високу точність і високу завадостійкість.

Структурна схема ЦВ урівноваженого перетворення подана на рисунку 8.2.

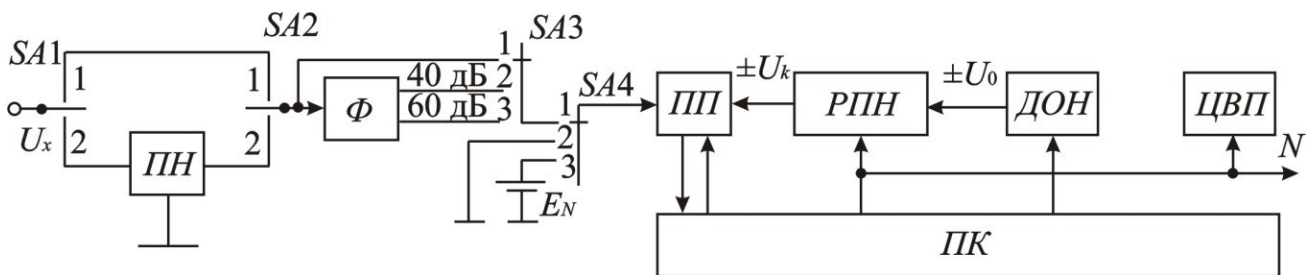


Рисунок 8.2 – Структурна схема ЦВ урівноваженого перетворення

Вимірювана напруга U_x безпосередньо (перемикачі $SA1$ і $SA2$ в позиції 1) або через розділювач 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 дБ 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*.

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

$$K_D = a \cdot N, \quad (8.1)$$

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 у схемі рівновагу $U_x = U_K = U_D \cdot U_0 = a \cdot U_0 \cdot N$, звідки

$$N = \frac{U_x}{a \cdot U_0}, \quad (8.2)$$

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 мкВ 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 завдяки дії зовнішніх змінних електромагнітних полів. Для зниження цих завад площу провідного контуру прагнуть зробити мінімальною і під'єднувати 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 під'єднується 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-подібні 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

$$K_n = 20 \cdot \lg \frac{e_n}{e_n^*}. \quad (8.3)$$

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 200 мВ до 200 В, точністю 0,1 %; щитові змінного струму (ОМ 47АС); універсальні ЦВ (В7-77 (рис. 8.3)).



Рисунок 8.3 – Зовнішній вигляд цифрового вольтметра В7-77

Вольтметр В7-77 має діапазон вимірювань 10 мкВ – 1 000 В, похибку вимірювань $\pm 0,05\%$ для постійного струму, та діапазон вимірювань 1 мВ – 750 В, з похибкою вимірювань $\pm 0,05\%$ для змінного струму.

8.2 Цифрові осцилографи

Можна виділити такі переваги цифрового осцилографа порівняно 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'ятовувальних 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 рисунку 8.4 зображений зовнішній вигляд двоканального цифрового осцилографа ATTEN ADS1022C.



Рисунок 8.4 – Зовнішній вигляд цифрового осцилографа ATTEN ADS1022C

Характеристики осцилографа: смуга пропускання 25 МГц; частота дискретизації 500 Мбит/с; довжина внутрішньої пам'яті до 4 К. Вбудовані 32автоматичні 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'ятовувальних пристроїв.

ТЕМА 9 ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

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 рисунку 9.1. Струмова котушка включається послідовно з навантаженням, а котушка напруги – паралельно навантаженню.

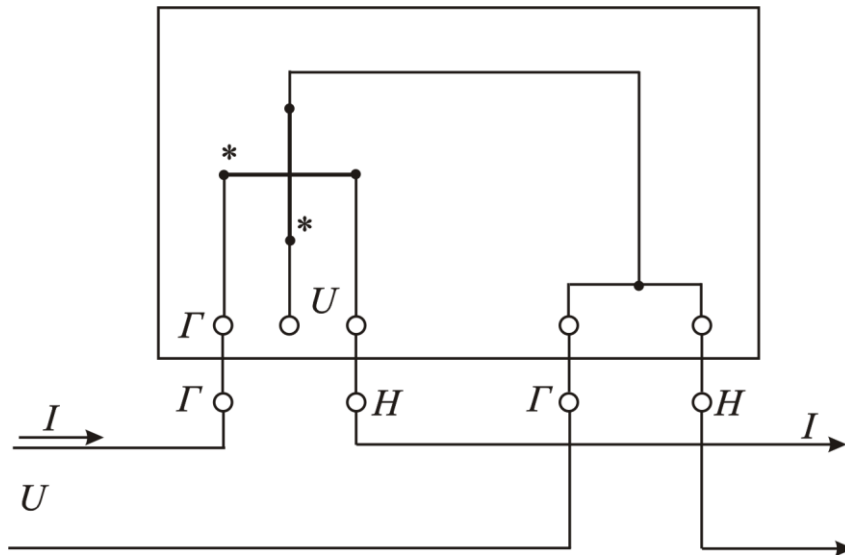


Рисунок 9.1 – Схема включення лічильника в низьковольтну мережу

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 рисунку 9.2.

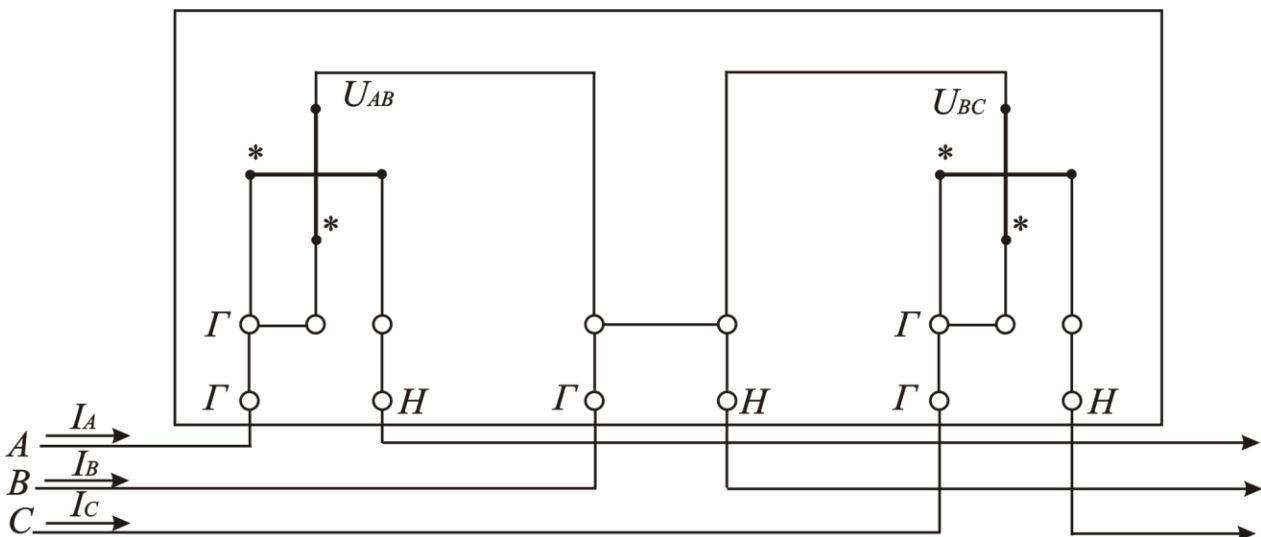


Рисунок 9.2 – Схема включення трифазного лічильника в мережу

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 рисунку 9.3.

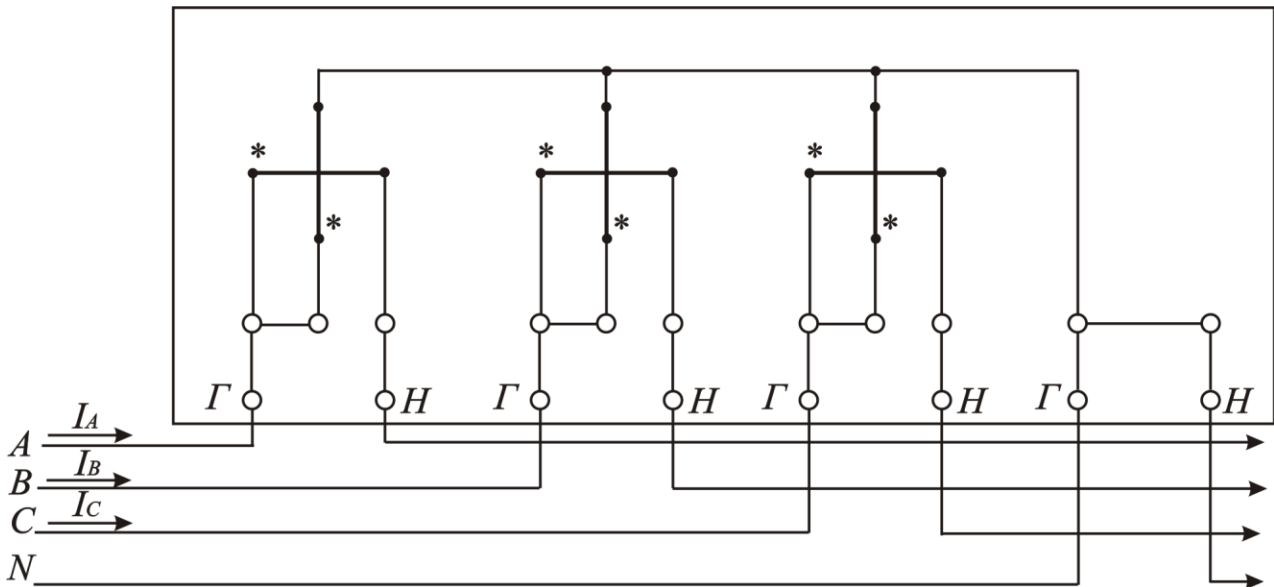


Рисунок 9.3 – Схема включення триелементного лічильника в мережу

На рисунку 9.4 показаний зовнішній вигляд однофазного СО-ЭЭ6706 (рис. 9.4, а) і трифазного СА3-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 СА3-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.



Рисунок 9.4 – Зовнішній вигляд лічильників активної електричної енергії:

а – однофазний СО-ЭЭ6706; б – трифазний СА3-И667

Останнім часом значного поширення набули цифрові лічильники електричної енергії. Тенденція їхнього 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 перемноження сигналів і надавати отриману величину в зручній для мікроконтролера формі. Наприклад, перетворювач активної потужності – у 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 тощо.

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. У 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). За такої структури мікроконтролеру потрібно підсумувати число імпульсів, виводити інформацію на дисплей і здійснювати її захист у різних аварійних режимах. Розглянутий лічильник фактично становить цифровий функціональний аналог існуючих механічних лічильників, пристосований до подальшого вдосконалення.

Навантаження

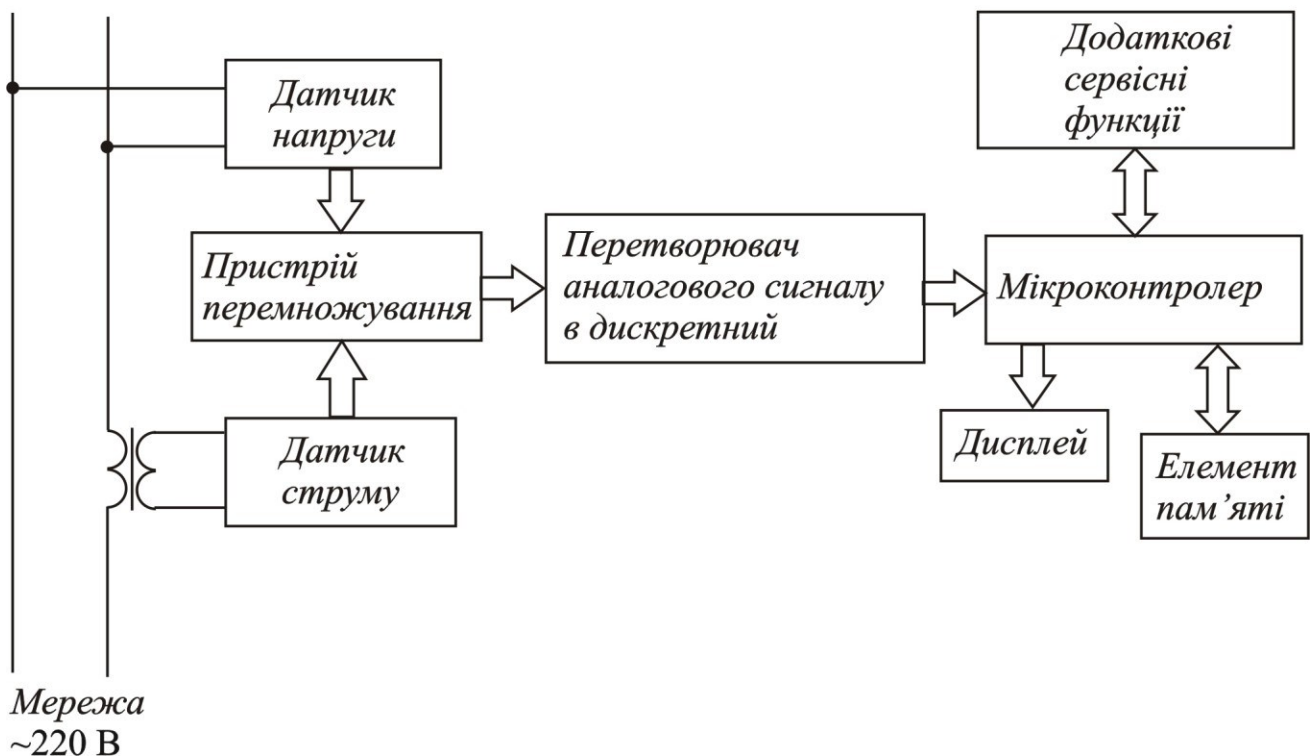


Рисунок 9.5 – Блок-схема реалізації цифрового лічильника електроенергії

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.

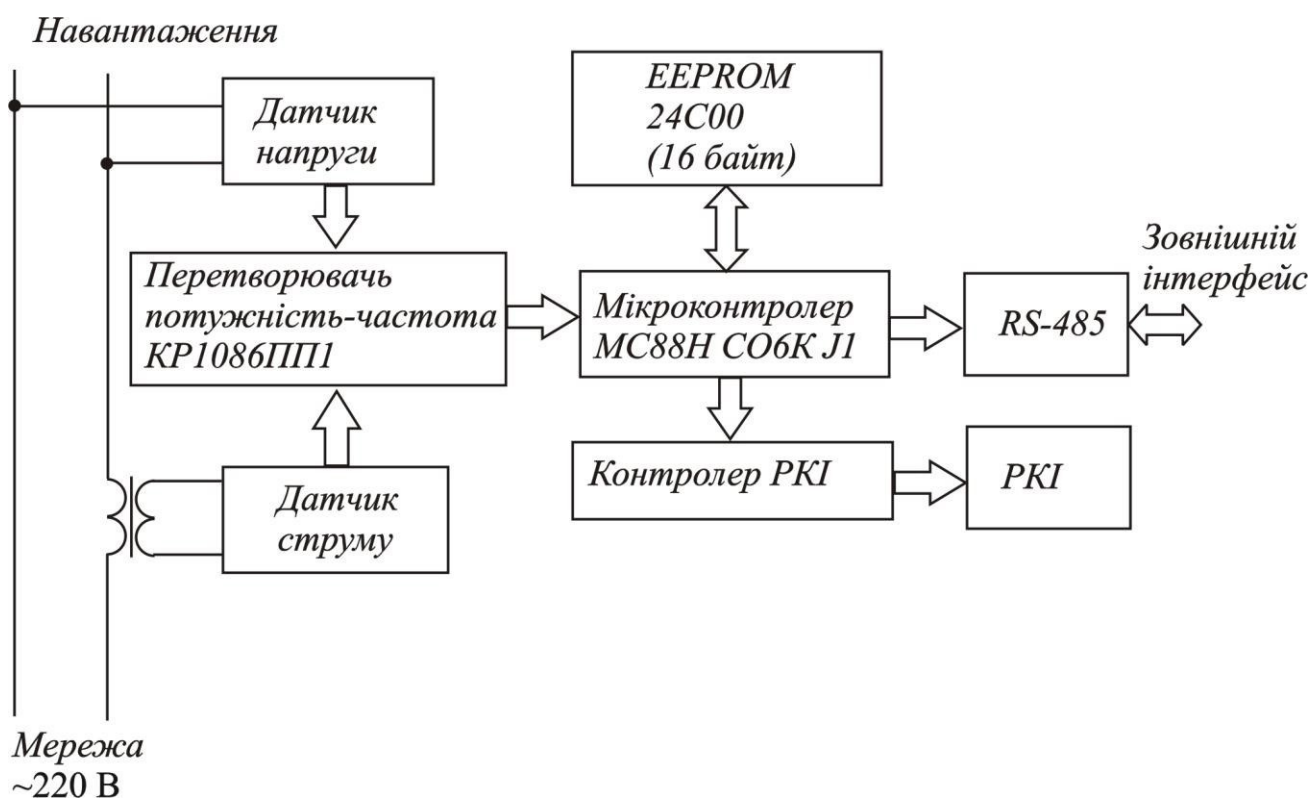


Рисунок 9.6 – Блок-схема реалізації цифрового лічильника електроенергії на базі мікроконтролера МС68НС05КJ1

До сучасних цифрових лічильників електричної енергії можна віднести: СЭТ-4ТМ.03, СЭБ-24.07, ME, ED 2500 (рис. 9.7) та ін.



Рисунок 9.7 – Зовнішній вигляд цифрового лічильника електроенергії ED 2500

Лічильник ED 2500 має такі характеристики: клас точності – 1,0; номінальна напруга – 220 В; номінальний (максимальний) струм – 5 (65) А; стала лічильника – 1 000 імп/квар · год; споживана потужність – 1,8 В · А; інтерфейси даних: оптичний інтерфейс до 4 800 бод, електронний інтерфейс RS485 до 9600 бод, протоколи даних IEC 62056-21.

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 та ін.

На рисунку 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.

ТЕМА 10 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

До параметрів кола відносяться:

1. Активний опір R .
2. Ємність C , кут діелектричних втрат $\text{tg}\delta$.
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).

10.1 Прямі методи вимірювань активних опорів

За величиною опори поділяються 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 зазвичай вимірюють на постійному струмі, а опори провідників, що мають велику вологість (рідини, заземлення), – на змінному.

10.2 Вимірювання опору мостом постійного струму

Для вимірювань середніх опорів до 1 МОм дуже часто використовують одинарні мости постійного струму (рис. 10.1). 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. 10.1). До однієї з діагоналей цієї схеми подають живлення від джерела ЕРС E . А в іншу діагональ через вимикач $SA1$ і обмежувальний опір R_0 включають високочутливий гальванометр Γ .

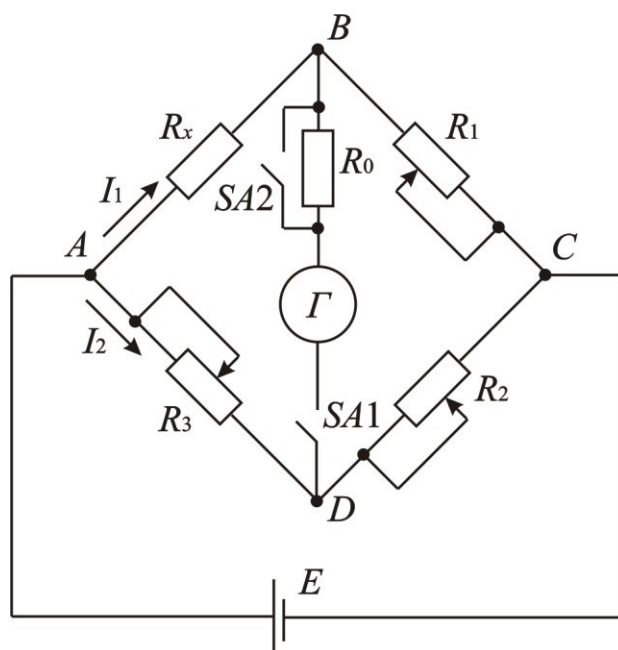


Рисунок 10.1 – Схема одинарного мосту постійного струму

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

$$I_G = \frac{\varphi_B - \varphi_D}{R_0}.$$

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. За $I_G = 0$, $\varphi_B = \varphi_D$, а напруги $U_{AB} = U_{AD}$ і $U_{BC} = U_{DC}$. Виразивши ці напруги через струми та опори $U_{AD} = I_2 \cdot R_3$, $U_{BC} = I_1 \cdot R_1$, $U_{DC} = I_2 \cdot R_2$, $U_{AB} = I_1 \cdot R_x$, одержимо дві рівності:

$$I_1 \cdot R_x = I_2 \cdot R_3 \quad (10.1)$$

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$$

Розділивши першу рівність на другу, одержимо

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot R_3. \quad (10.2)$$

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:

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}. \quad (10.3)$$

У реальних одинарних мостах змінюють або опір резистора R_1 (його називають плечем порівняння), або відношення опорів R_3/R_2 . Найбільше

поширені мости, у яких плавно змінюється опір R_1 , і стрибками, зазвичай



кратними 10, змінюється відношення R_{333} або DY-B23A (рис. 10.2).

Рисунок 10.2 – 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

$$S_M = S_G \cdot S_{cx}, \quad (10.4)$$

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_G , S_{cx} у S_M , одержимо

$$S_M = \frac{\Delta\alpha}{\Delta R}. \quad (10.5)$$

Іноді користуються поняттям відносної чутливості мосту

$$S_M = \frac{\Delta\alpha}{(\Delta R / R)} = \frac{\Delta\alpha}{\zeta}, \quad (10.6)$$

де ζ – відносна зміна опору у вимірюваному плечі.

Залежно від конструктивного оформлення розрізняють магазинні й лінійні (реохордні) мости. У магазинному мосту 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 сполучуваних 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. 10.3).

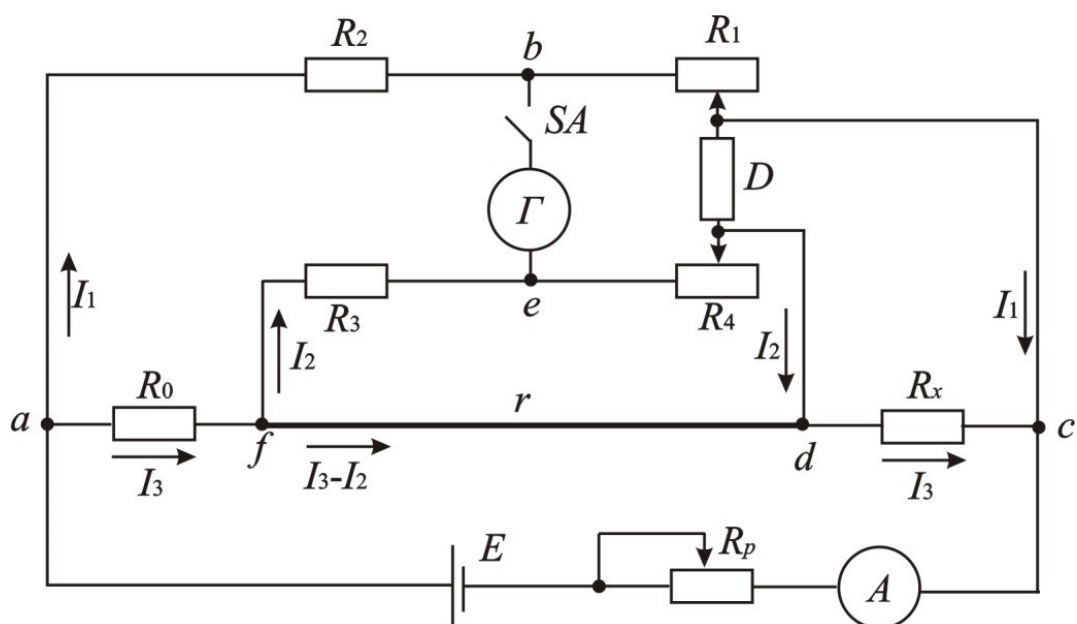


Рисунок 10.3 – Схема подвійного мосту постійного струму

Плечима подвійного мосту постійного струму слугують 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:

$$R_x = R_0 \cdot \frac{R_1}{R_2} - \frac{r \cdot R_3}{r + R_3 + R_4} \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right), \quad (10.7)$$

де r – опір спеціального каліброваного резистора.

Із формули (10.7) 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 потрібно 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 (10.7) практично дорівнює нулю. Значення вимірюваного опору можна визначити з формули:

$$R_x = R_0 \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (10.8)$$

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

Найбільше поширені комбіновані мости постійного струму, розраховані на роботу за схемами одинарного й подвійного мосту.

На рисунку 10.4 подано зовнішній вигляд подвійного вимірювального мосту постійного струму DY-B44.



Рисунок 10.4 – Зовнішній вигляд подвійного вимірювального мосту постійного

струму DY-B44

Міст DY-B44 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.

10.3 Вимірювання опору 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. 10.5, б). Прилади для вимірювань опорів порядку декількох тисяч Ом виконуються за послідовною схемою й мають зворотну шкалу (рис. 10.5, а).

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

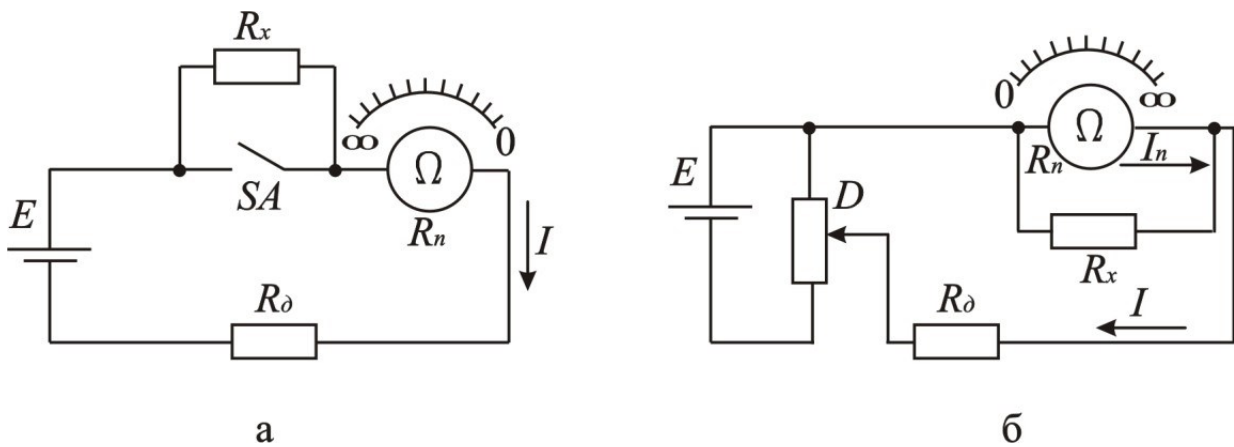


Рисунок 10.5 – Схеми включення омметра: а – послідовне включення (при вимірюванні опорів більше 100 Ом;) б – паралельне включення (при вимірюванні опорів до 100 Ом)

Струм, що протікає через прилад (рис. 10.5, а):

$$I = \frac{E}{R_x + R_d + R_n}, \quad (10.9)$$

де E – ЕРС джерела живлення;

R_0 – опір, що обмежує силу струму;

R_n – внутрішній опір приладу.

Оскільки R_0 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 за послідовного включення:

$$\alpha = \frac{E}{(R_x + R_0 + R_n) \cdot C_I} = F(R_x), \quad (10.10)$$

де C_I – ціна розподілу приладу за струмом.

Працюють омметри в такий спосіб. Перед вимірюванням натискають кнопку SA (рис. 10.5, 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. 10.5, б):

$$I = \frac{E}{R_0 + \frac{R_n \cdot R_x}{R_n + R_x}}. \quad (10.11)$$

Струм, що протікає через прилад:

$$I_n = I \cdot \frac{R_x}{R_p + R_x} = \frac{E}{\frac{R_o(R_n + R_x)}{R_x} + \frac{R_n \cdot R_x}{R_x}} = \frac{E}{\frac{R_o \cdot R_n}{R_x} + R_o + R_n}. \quad (10.12)$$

Рівняння шкали при паралельному включенні:

$$\alpha = \frac{E \cdot C_1}{\frac{R_o \cdot R_n}{R_x} + R_o + R_n} = f(R_x). \quad (10.13)$$

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 $B \cdot U = const$. 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 рисунку 10.6 подано зовнішній вигляд омметра М419. Прилад призначений для вимірювань опорів від 0 Ом до 5 МОм. Клас точності приладу 2,5. Працює на частотах від 45 Гц до 500 Гц. Споживана потужність не більше 1 Вт. Вхідний опір 250 кОм.



Рисунок 10.6 – Зовнішній вигляд омметра М419.

Сучасна промисловість випускає цілу низку цифрових омметрів підвищеної точності з широким діапазоном вимірювань. На рисунку 10.7 показаний зовнішній вигляд цифрового міліомметра GOM-802.



Рисунок 10.7 – Зовнішній вигляд цифрового міліомметра GOM-802

Діапазон вимірюваних опорів приладу GOM-802 від 1 мкОм до 3 МОм. Похибка вимірювань не вище $\pm 0,1\%$.

10.4 Вимірювання опору мегомметром

Мегомметр призначений для вимірювань великих опорів (кіло- та мега-Ом) і становить 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:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right), \quad (10.14)$$

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: за обертання ручки генератора стрілка має 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 В, 500 В і 1000 В і межами вимірювань опору ізоляції від 0 до 1 000 МОм типів М1101М, М1102/1, М503М, МС-0,5 і ін. На рисунку 10.8 показаний зовнішній вигляд мегомметра ЭС 0210.



Рисунок 10.8 – Зовнішній вигляд мегомметра ЭС 0210

Мегомметр ЭС 0210, розраховано на вимірювання опорів від 0,5 МОм до 100 000 МОм.

10.5 Вимірювання ємності та індуктивності прямими методами

10.5.1 Вимірювання 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. 10.9). 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.

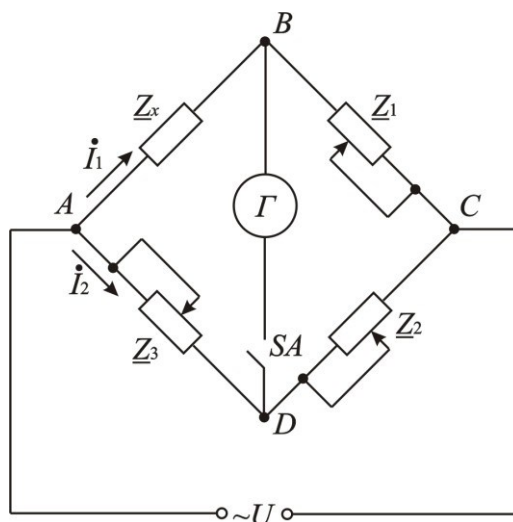


Рисунок 10.9 – Схема вимірювального мосту змінного струму

Умова рівноваги мосту в комплексній формі:

$$\underline{Z}_x \cdot \underline{Z}_2 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 \quad (10.15)$$

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

$$\begin{cases} Z_x \cdot Z_2 = Z_1 \cdot Z_3 \\ \varphi_x \cdot \varphi_2 = \varphi_1 \cdot \varphi_3 \end{cases} \quad (10.16)$$

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

$$\varphi_x = \varphi_3. \quad (10.17)$$

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

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

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

Міст змінного струму Р577 відноситься до універсальних, тому що дозволяє вимірювати ємність, індуктивність, $\operatorname{tg} \delta$, Q і R . Похибка вимірювань $\pm 1,0\%$. Робоча частота 1 000 Гц. Межі вимірювань ємності від 1 пФ до 1 100 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 рисунку 10.10 показаний зовнішній вигляд високовольтного вимірювального мосту змінного струму СА7100-2.



Рисунок 10.10 – Зовнішній вигляд високовольтного вимірювального мосту постійного струму

Міст призначений для вимірювань електричної ємності і тангенса кута діелектричних втрат, напруги і частоти змінного струму, опору постійному струму.

10.5.2 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. 10.11).

Послідовно з однією з рухомих котушок включена зразкова ємність C_0 , а послідовно з іншою – вимірювана ємність C_x . Опори котушок роблять настільки малими порівняно 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:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{C_x}{C_0}\right). \quad (10.18)$$

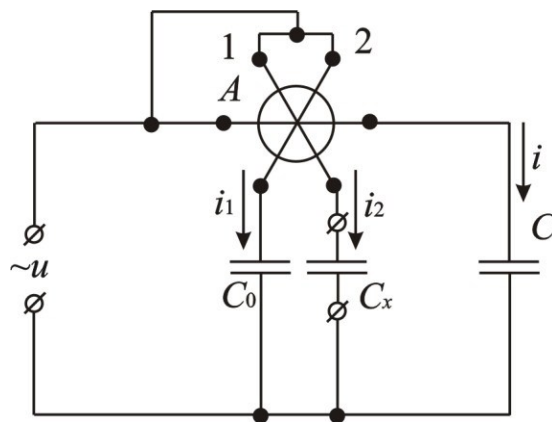


Рисунок 10.11 – Схема підключення фарадметра

Кожному значенню ємності C_x при постійній зразковій ємності відповідає певний кут відхилення стрілки логометра. Отже, шкалу логометра можна відградувати 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 рисунку 10.12 показаний зовнішній вигляд ручного електронного фарадметра DM-9023. Межа вимірювань приладу від 200 пФ до 20 000 мкФ. Похибка вимірювань не більше $\pm 2\%$. Джерело живлення – батарея 9 В.



Рисунок 10.12 – Зовнішній вигляд ручного фарадметра DM-9023

10.5.3 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 рисунку 10.13.

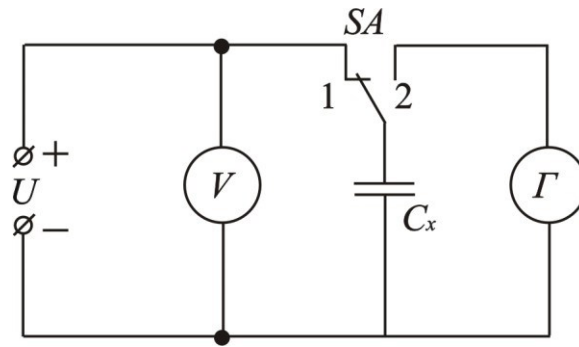


Рисунок 10.13 – Схема вимірювання ємності балістичним гальванометром і вольтметром

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 покажчик гальванометра починає відхилятися до якогось максимального значення α_{\max} . Знаючи балістичну постійну гальванометра C_{σ} із його паспорта, можна визначити вимірювану ємність:

$$C_x = \frac{Q}{U} = \frac{C_{\sigma} \cdot \alpha_{\max}}{U}, \quad (10.19)$$

де C_{σ} – балістична постійна гальванометра;

α_{\max} – максимальне відхилення покажчика гальванометра;

U – напруга, вимірювана вольтметром.

ТЕМА 11 ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

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 під час технічних вимірювань 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, переважно промислової частоти.

11.1 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:

$$P = U \cdot I = I \cdot R^2 = \frac{U^2}{R} = U^2 \cdot G, \quad (11.1)$$

де R – опір навантаження;

G – провідність навантаження.

З (11.1) зрозуміло, що потужність у 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. Використовуючи цей метод, необхідно враховувати опір навантаження і залежно від цього вибирати схему включення приладів.

Якщо навантаження має великий опір, то вольтметр потрібно включати до амперметра (рис. 11.1, а). У цьому випадку, виконавши множення показників приладів, одержуємо:

$$P = U \cdot I = (U_A + U_R) \cdot I = U_A \cdot I + U_R \cdot I = \Delta P_A + P_H, \quad (11.2)$$

де U_A – падіння напруги в амперметрі;

U_R – падіння напруги в навантаженні;

ΔP_A – потужність, що розсіюється в амперметрі;

P_H – потужність навантаження.

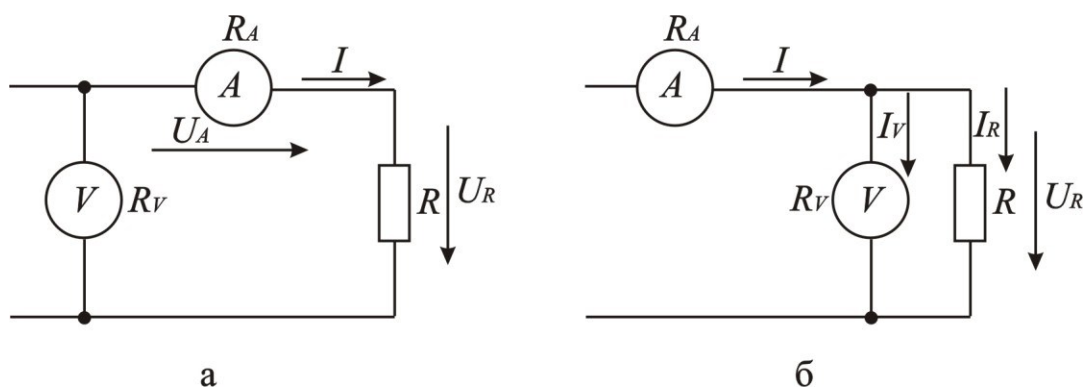


Рисунок 11.1 – Схеми включення амперметра і вольтметра під час вимірювання потужності: а – якщо навантаження має великий опір; б – якщо навантаження має невеликий опір

Із формули (11.2) зрозуміло, що вимірюване значення потужності P виявляється більше дійсної потужності навантаження P_H на величину ΔP_A , отже, відносна похибка вимірювань:

$$\delta = \frac{\Delta P_A}{P} \cdot 100 = \frac{R_A}{R} \cdot 100, \quad (11.3)$$

де R_A – опір амперметра.

Із (11.3) 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. 11.1, б). Добуток показників приладів:

$$P = U \cdot I = U_R \cdot (I_V + I_R) = U_R \cdot I_V + U_R \cdot I_R = \Delta P_V + P_H, \quad (11.4)$$

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:

$$\delta = \frac{\Delta P_V}{P} \cdot 100 = \frac{R}{R_V} \cdot 100, \quad (11.5)$$

де R_V – опір вольтметра.

Із (11.5) 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 рисунку 11.2 показане включення ватметра PW для вимірювань потужності P .

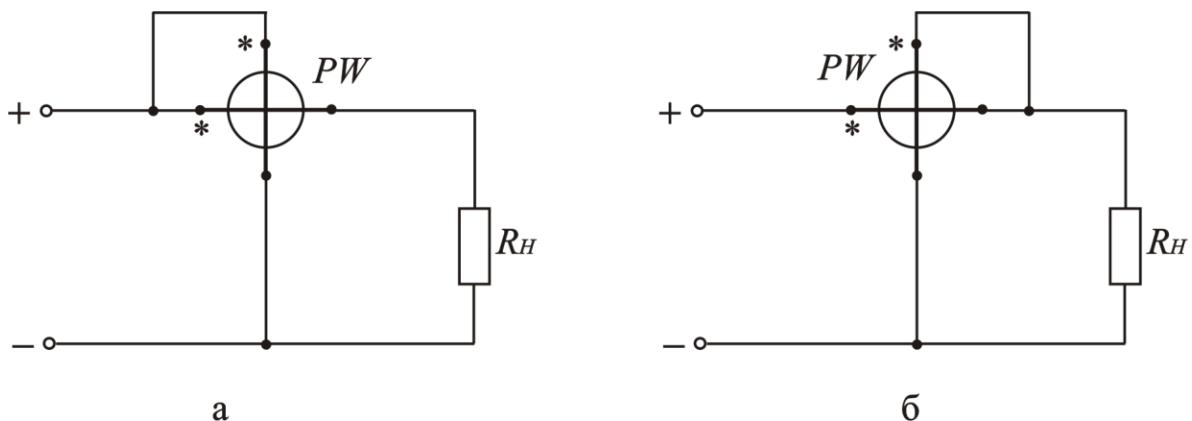


Рисунок 11.2 – Включення ватметра для вимірювань потужності:

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. 11.2, а) або (рис. 11.2, б). Схема (рис. 11.2, а) використовується за достатньо великого опору навантаження R_H , а схема за (рис. 11.2, б) – за відносно малого значення опору навантаження.

У більшості випадків застосування ватметрів опір навантаження R_H відносно великий, а отже, ватметр необхідно включати за схемою (рис. 11.2, а).

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

$$P = n \cdot C_p = n \cdot \frac{U_H \cdot I_H}{N}, \quad (11.6)$$

де U_H , I_H – відповідно номінальне значення напруги й струму обмоток ватметра;

N – кількість позначок у шкалі приладу.

Лабораторні ватметри випускаються зазвичай багатомезними. 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.

11.2 Вимірювання потужності в колах змінного струму

11.2.1 Вимірювання активної потужності в однофазному колі змінного струму

Значення активної потужності в однофазному колі змінного струму визначають за формулою:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad (11.7)$$

де U – напруга навантаження;

I – струм навантаження;

φ – фазовий зсув між напругою й струмом.

З формули зрозуміло, що потужність навантаження можна визначити непрямым 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 можуть 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 (рис. 11.2). 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 їхній шкалі зазначено, для яких $\cos\varphi$ вони призначені.

Під час вимірювання потужності у високовольтному колі змінного струму використовують вимірювальні трансформатори струму і напруги (рис. 11.3). 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 PW множать на коефіцієнти k_I і k_U трансформації за струмом і напругою:

$$P = n \cdot C_P \cdot k_I \cdot k_U = P_W \cdot k_I \cdot k_U, \quad (11.8)$$

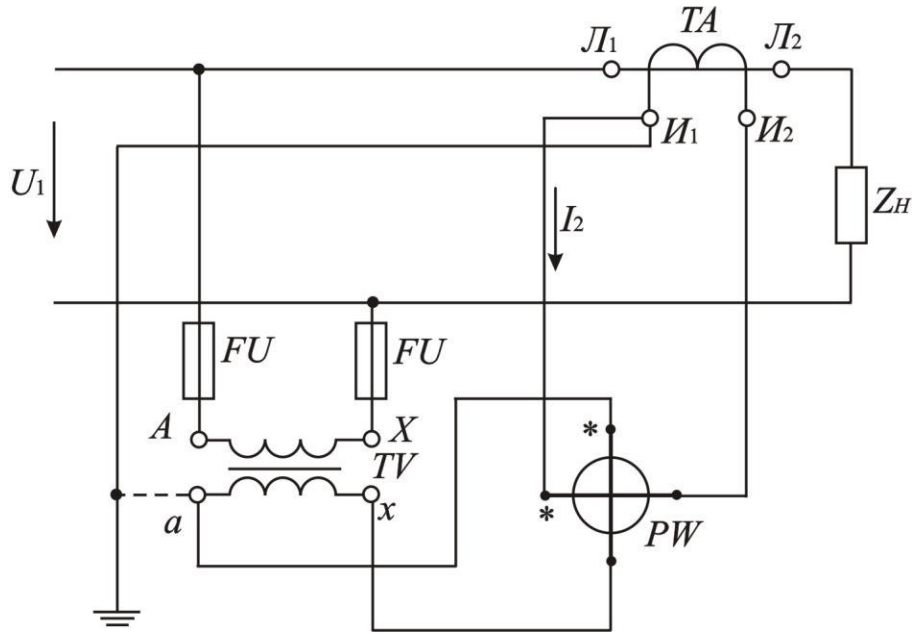


Рисунок 11.3 – Включення ватметра для вимірювань потужності у високовольтному колі змінного струму

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.

11.2.2 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:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}, \quad (11.9)$$

де S – повна потужність;

P – показники ватметра;

U – показники вольтметра;

I – показники амперметра.

11.2.3 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 так, щоб він показував потужність однієї фази, (рис. 11.4, а), тоді загальна потужність буде більшою показників ватметра втричі:

$$P = 3 \cdot P_W, \quad (11.10)$$

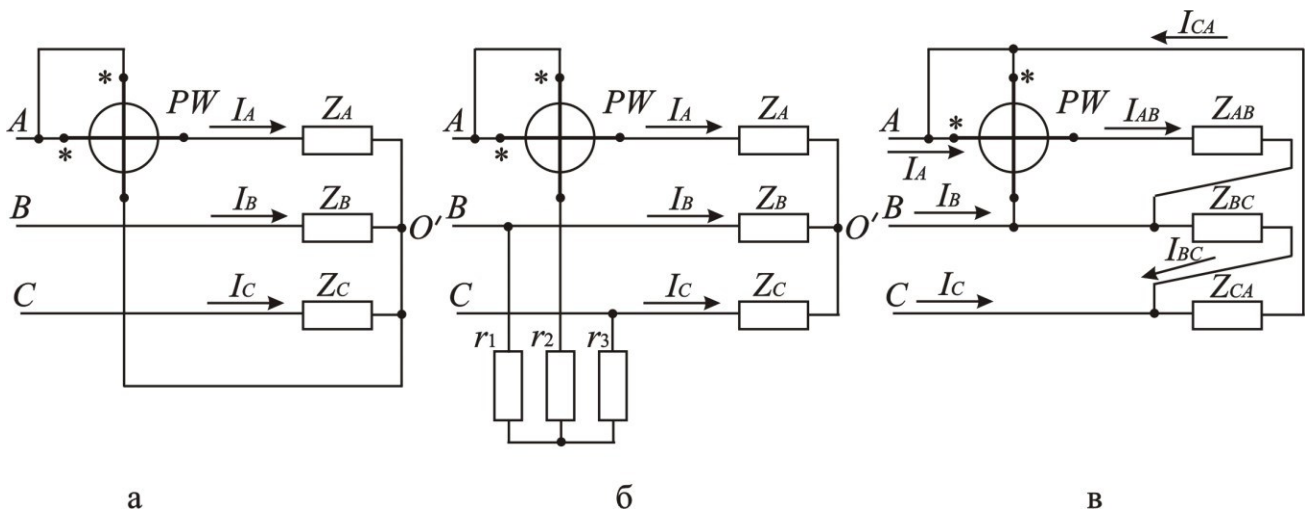


Рисунок 11.4 – Вимірювання активної потужності в симетричних трифазних трипровідних колах змінного струму: а – при симетричному навантаженні, з'єднаному в зірку; б – зі штучною нульовою точкою; в – при симетричному навантаженні, з'єднаному в трикутник

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. 11.4, б). Цей метод можливий тільки за використання 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. 11.4, в) I_{AB} , а котушку напруги – на лінійну напругу U_{AB} . Потужність трифазного навантаження визначають за формулою (11.10).

Активну потужність трифазного несиметричного навантаження можна виміряти за допомогою двох ватметрів, якщо включити їх за схемою, показаною на рисунку 11.5.

Значення активної потужності трифазного навантаження можна розрахувати за формулою:

$$P = U_{CA} \cdot I_A \cdot \cos\psi_1 + U_{BC} \cdot I_B \cdot \cos\psi_2 = P_{W1} + P_{W2}, \quad (11.11)$$

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.

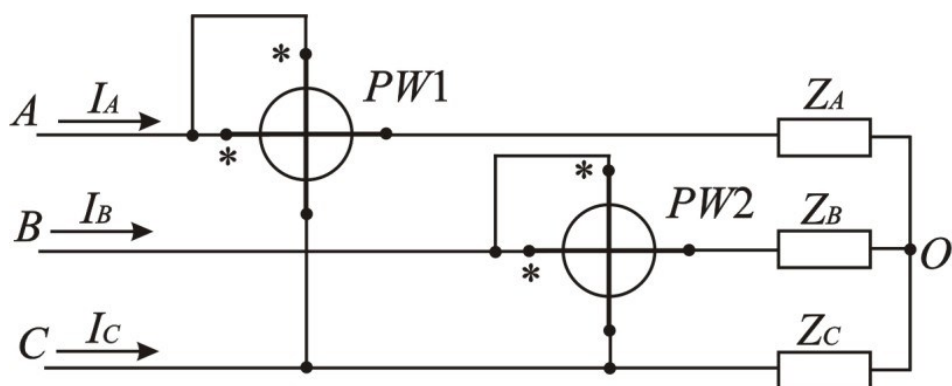


Рисунок 11.5 – Вимірювання активної потужності трифазного несиметричного навантаження

Під час вимірювання потужності двома ватметрами є можливість орієнтовно судити за їхніми показниками про значення коефіцієнта потужності трифазного навантаження. Наприклад, якщо навантаження в трьох фазах активне і симетричне, то показники двох ватметрів будуть однакові. Якщо навантаження має 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 такими: $P_{W1} = U_{л} \cdot I_{л} \cdot 0,866$, $P_{W2} = U_{л} \cdot I_{л} \cdot 0 = 0$. Якщо показники одного ватметра дорівнюють нулю, це означає, що $\cos\varphi$ зменшився до 0,5.

Активну потужність у 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. 11.6). За підключення 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.

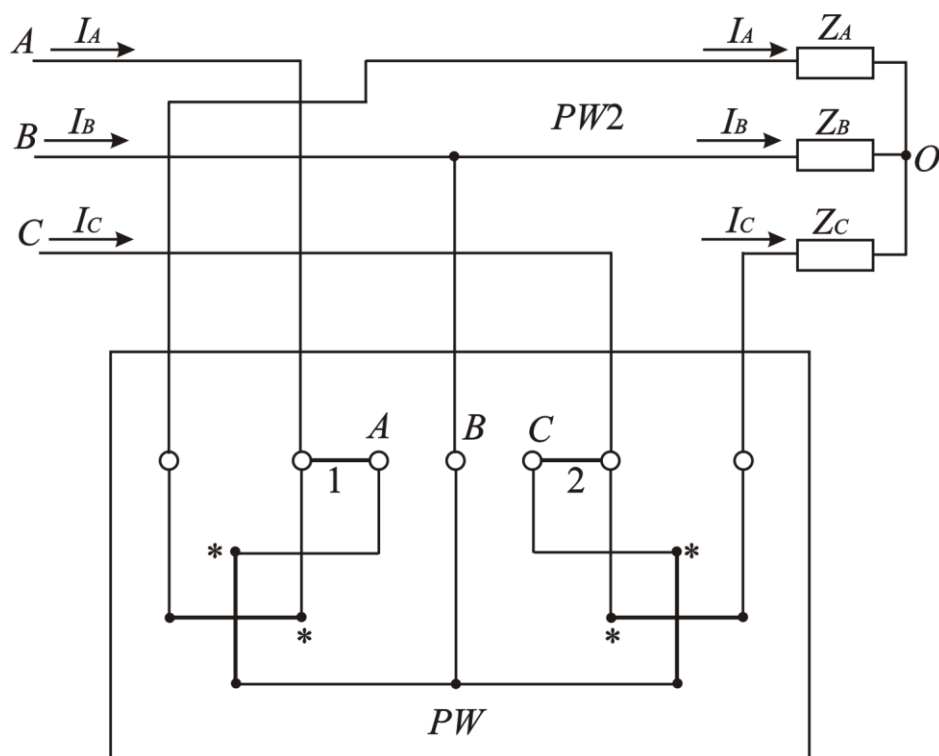


Рисунок 11.6 – Схема підключення трифазного ватметра

11.2.4 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. 11.7, а). Тоді значення потужності трифазного приймача можна визначити за формулою (11.10).

Якщо навантаження несиметричне, то потрібно включити три ватметра – по одному в кожен фазу (рис. 11.7, б). Тоді сума показників трьох ватметрів буде давати значення активної потужності трифазного приймача:

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (11.12)$$

11.2.5 Вимірювання реактивної потужності в трифазному колі змінного струму

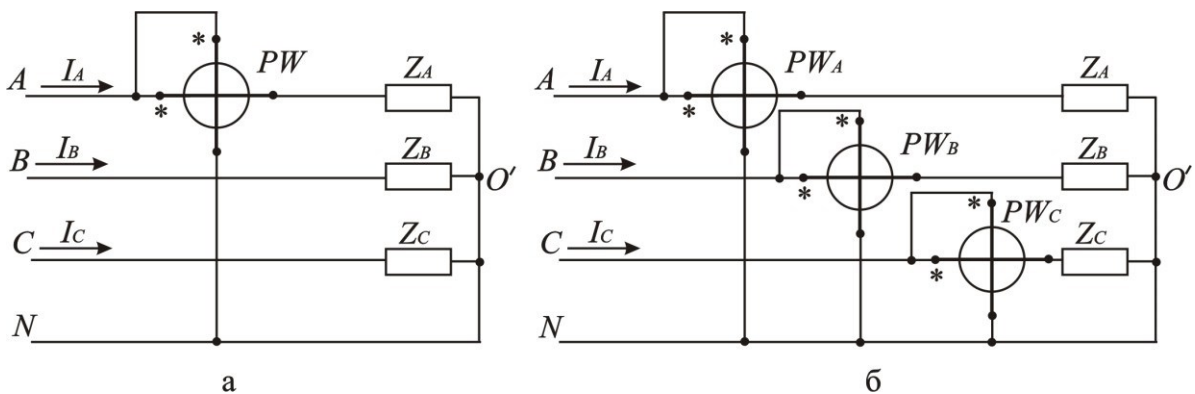


Рисунок 11.7 – Вимірювання активної потужності в трифазних чотирипровідних колах: а – при симетричному навантаженні;

б – при несиметричному навантаженні

У ватметрі для вимірювань реактивної потужності (варметри) трифазної мережі є дві основні струмові котушки і дві допоміжні (рис. 11.8). Основні струмові котушки зазвичай включають: одну на струм I_A , іншу – на струм I_C .

Допоміжні обмотки включають послідовно й зустрічно у фазу B . У цьому приладі сума чотирьох обертальних моментів пропорційна реактивній потужності трифазного приймача за будь-якого навантаження.

У трифазному симетричному колі реактивну потужність можна виміряти за допомогою одного ватметра (рис. 11.9). 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:

$$P_W = I_A \cdot U_{BC} \cdot \cos\psi = I_A \cdot U_{BC} \cdot \cos(90 - \varphi) = I_A \cdot U_{BC} \cdot \sin\varphi. \quad (11.13)$$

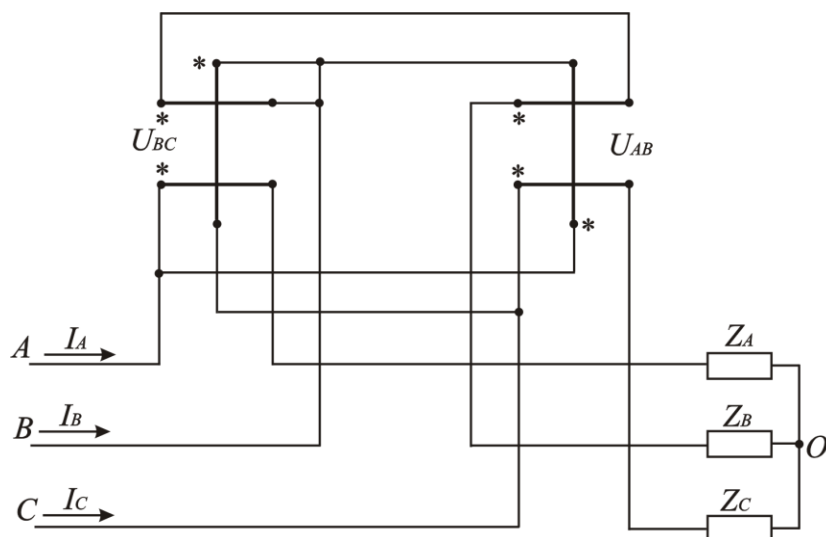


Рисунок 11.8 – Підключення трифазного ватметра для вимірювань реактивної потужності в трифазному колі змінного струму

Якщо помножити (11.13) на $\sqrt{3}$, то одержимо вираз для визначення реактивної потужності трифазного навантаження:

$$Q = I_A \cdot U_{BC} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin\varphi = P_W \cdot \sqrt{3}. \quad (11.14)$$

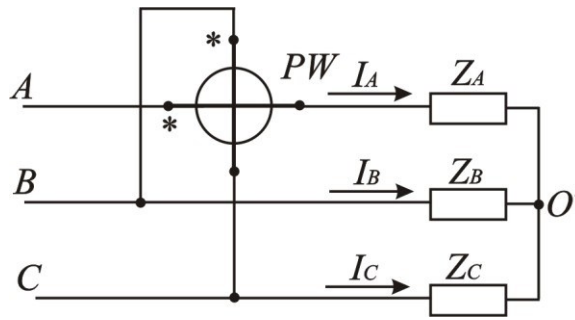


Рисунок 11.9 – Вимірювання реактивної потужності в симетричному трифазному колі

У разі несиметричного навантаження 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. 11.10).

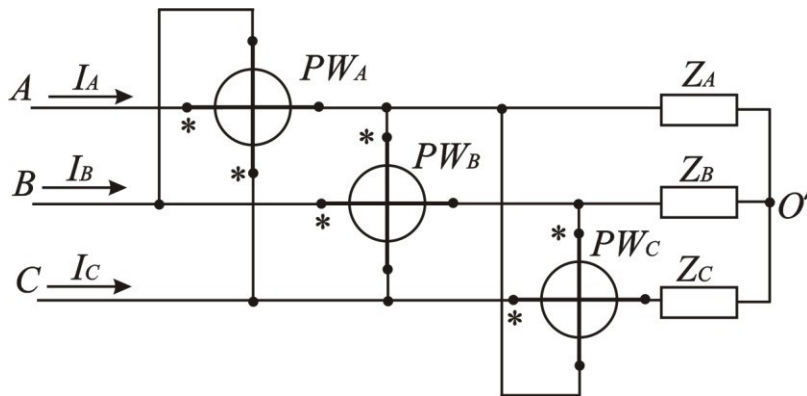


Рисунок 11.10 – Вимірювання реактивної потужності в несиметричному трифазному колі

У цьому випадку реактивну потужність можна знайти за формулою:

$$Q = \frac{P_{WA} + P_{WB} + P_{WC}}{\sqrt{3}}. \quad (11.15)$$

На рисунку 11.11 показаний зовнішній вигляд лабораторного електродинамічного однофазного вольтметра Д5093 (рис. 11.11, а) і щитового трифазного мегаватметра Д345 (рис. 11.11, б).



а



б

Рисунок 11.11 – Зовнішній вигляд ватметрів: а – однофазного Д5093;
б – трифазного Д345

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 Гц до 65 Гц, робочий діапазон частот понад 150 Гц до 500 Гц, номінальний струм від 0 А 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 Вт до 1,2 МВт, номінальний струм від 0 А до 5 000 А.

ТЕМА 12 ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ, КУТА ЗСУВУ ФАЗ ТА ЧАСТОТИ

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

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}, \quad (12.1)$$

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

У колі трифазного струму:

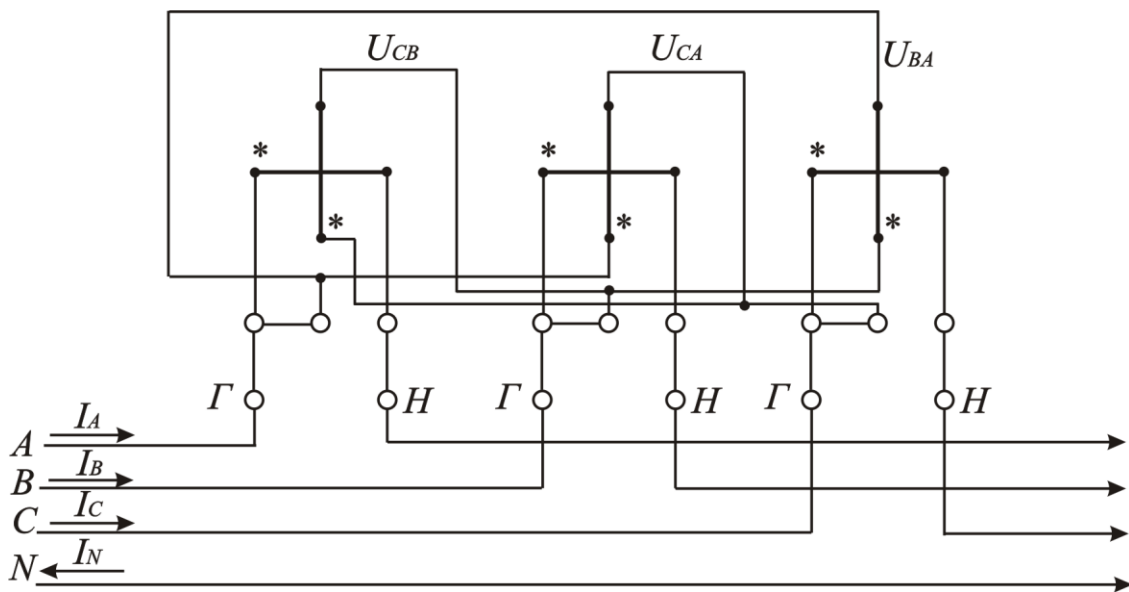


Рисунок 12.1 – Схема включення лічильника реактивної електроенергії

$$\cos \varphi = \frac{P_W}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L}, \quad (12.2)$$

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:

$$\cos \varphi = \frac{P_{W1} + P_{W2}}{2 \cdot \sqrt{P_{W1}^2 + P_{W2}^2 - P_{W1} \cdot P_{W2}}}. \quad (12.3)$$

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:

$$\cos \varphi_{cp.вз} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}}. \quad (12.4)$$

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

Найпоширенішими є фазометри електродинамічної системи (рис. 12.2, 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. 12.2, 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 $\beta_1 + \beta_2 = 90'$ й $|I_1| = |I_2|$.

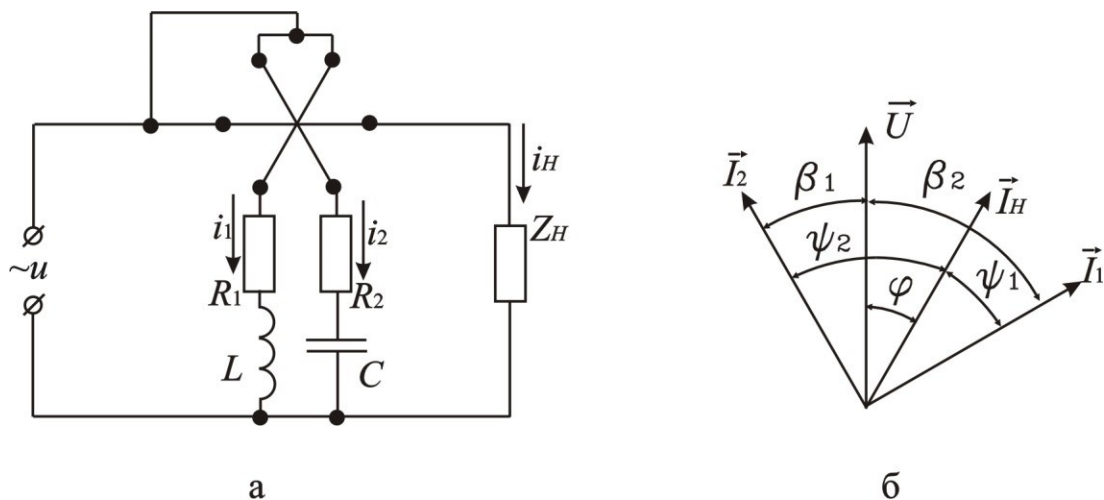


Рисунок 12.2 – Вимірювання фазового зсуву за допомогою фазометра:

а – схема підключення фазометра; б – векторна діаграма

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

Для вимірювань фазового зсуву між двома напругами часто застосовують цифрові фазометри. У 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.

Промисловість випускає щитові фазометри типу Ц302/1 (рис. 12.3), призначені для вимірювань коефіцієнта потужності в діапазонах 0,5–1–0,5 і 0,9–1–0,2 у трифазних трипровідних мережах змінного струму частотою 50 Гц. Номінальне значення струму приладу при підключенні безпосередньо через вимірювальний трансформатор – 5 А. Номінальні напруги – 127 В, 220 В, 380 В. Клас точності 2,5.

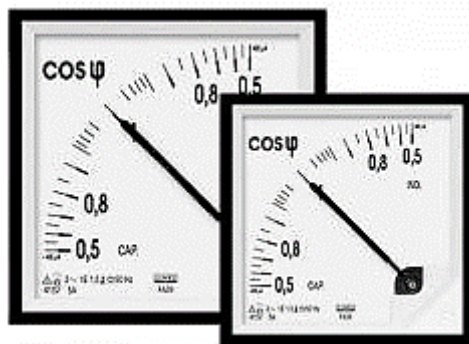


Рисунок 12.3 – Зовнішній вигляд фазометра Ц302/1

Для однофазних кіл є зручними переносні фазометри типу Д578 (рис. 12.4). Клас точності приладу 0,5. Межі вимірювань 0–1–0.



Рисунок 12.4 – Зовнішній вигляд фазометра Д578

Із цифрових фазометрів як приклад можна виділити щитовий фазометр серії Р (рис. 12.5).



Рисунок 12.5 – 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. 12.6, а). Визначивши розміри X і X_m , можна обчислити фазовий зсув:

$$\sin \varphi = \frac{X}{X_m}. \quad (12.5)$$

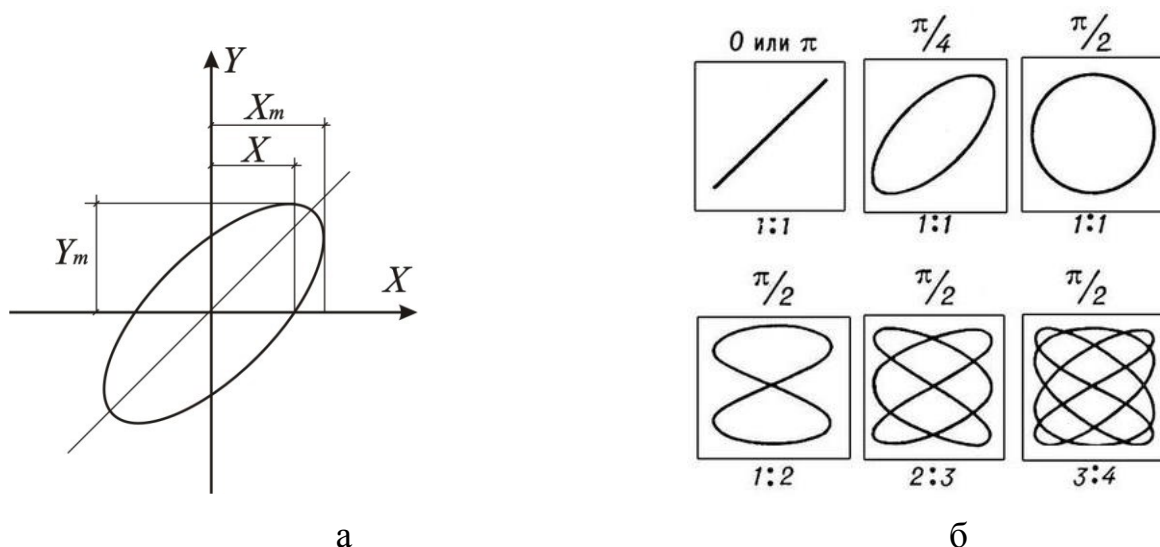


Рисунок 12.6 – Визначення фазового зсуву за допомогою осцилографа:

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. 12.6, 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. 12.7). Якщо виміряти відрізки ab і ac , що відповідають часу t_φ і T , то можна обчислити значення фази:

$$\varphi_x = \frac{l_{ab} \cdot 360}{l_{ac}}. \quad (12.6)$$

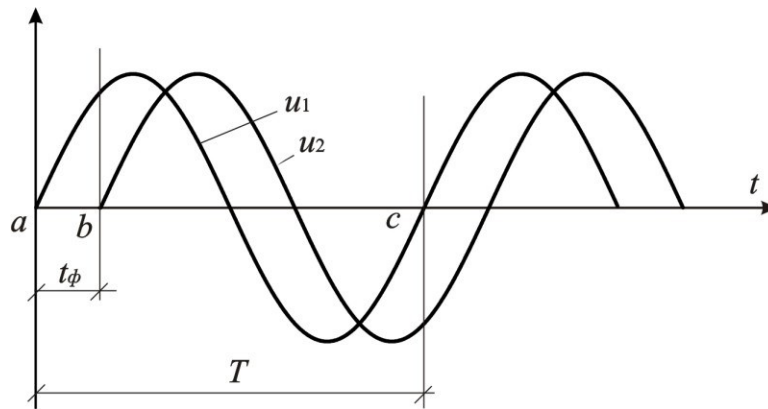


Рисунок 12.7 – Вимірювання фазового зсуву методом лінійного розгорнення

Похибка методу визначається неточністю вимірювань відрізків ab і ac .

ТЕМА 13 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 їхніми магнітними характеристиками.

У більшості випадків під час визначення 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 у 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.

13.1 Вимірювання магнітного потоку в постійному магнітному полі

13.1.1 Вимірювання за допомогою балістичного гальванометра (індукційно-імпульсний метод)

Цей метод заснований на вимірюванні кількості електрики в імпульсі струму, що наводиться у вимірювальній котушці під час зміни потокозчеплення. Для вимірювань магнітного потоку котушка з відомим числом витків w_k підключається до балістичного гальванометра через резистор R_d (рис. 13.1) і потім швидко виводиться з поля або вноситься в нього.

Зміна потоку, зчепленого з котушкою, спричиняє в ній ЕРС:

$$e = -\frac{w_k \cdot d\Phi}{dt}, \quad (13.1)$$

яка визначає струм:

$$i = \frac{e}{R} = -\frac{w_k}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (13.2)$$

де $R = R_r + R_k + R_d$ – загальний активний опір кола вимірювань, що дорівнює сумі опорів гальванометра, котушки та додаткового резистора.

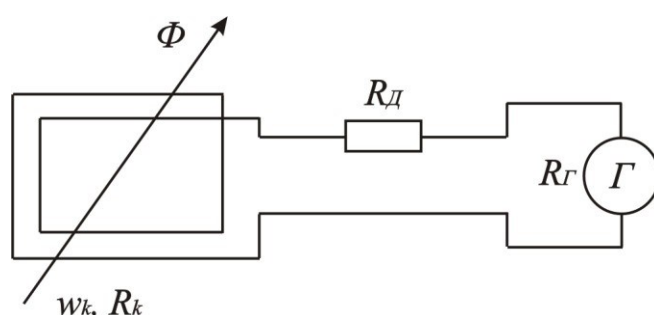


Рисунок 13.1 – Вимірювання магнітного потоку за допомогою балістичного гальванометра

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

$$dQ = idt = -\frac{w_k}{R} d\Phi. \quad (13.3)$$

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):

$$Q = \int_0^{t_1} idt = -\frac{w_k}{R} \int_{\Phi}^0 d\Phi = \frac{w_k}{R} \cdot \Phi. \quad (13.4)$$

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:

$$Q = 2 \cdot \frac{w_k}{R} \cdot \Phi. \quad (13.5)$$

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

$$Q = C_Q \cdot \alpha_{1m}, \quad (13.6)$$

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

Підставляючи (13.6) в (13.4), одержуємо:

$$\Phi = \frac{R}{w_k} \cdot C_Q \cdot \alpha_{1m} = \frac{C_\Phi}{w_k} \cdot \alpha_{1m}, \quad (13.7)$$

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

13.1.2 Вимірювання магнітного потоку веберметром

Веберметр призначений для прямого вимірювання магнітного потоку індукційно-імпульсним методом. Він становить 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. 13.2, а) і М1119 (рис. 13.2, б) із ціною розподілу 5×10^{-6} Вб/поз та 10^{-4} Вб/поз.



Рисунок 13.2 – Зовнішній вигляд веберметрів: а – мікровеберметра Ф191;
б – мілівеберметра М1119

Клас точності багатограничного мікровеберметра Ф191 становить 1,0 за опори зовнішнього кола не більше 100 Ом – 1 000 Ом. У мілівеберметра М1119 клас точності 1,0 при опорі зовнішнього кола не більше 10 Ом.

13.2 Вимірювання магнітної індукції й напруженості магнітного поля

13.2.1 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

площина витків вимірювальної котушки перпендикулярна до напрямку вектора магнітної індукції, то:

$$B = \Phi \cdot S, \quad (13.8)$$

де S – площа витка.

З огляду на (13.7), маємо:

$$B = \frac{C_\Phi}{S \cdot w_k} \cdot \alpha_{1m}. \quad (13.9)$$

Для вимірювань магнітної індукції необхідно, як і під час вимірювання магнітного потоку, змінивши потікозчеплення вимірювальної котушки, відрахувати перше найбільше відхилення показчика балістичного гальванометра і зробити розрахунок за (13.9).

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

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{C_\Phi}{\mu_0 \cdot S \cdot w_k} \cdot \alpha_{1m} = \frac{C_\Phi}{k} \cdot \alpha_{1m}, \quad (13.10)$$

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 показчика гальванометра при вмиканні або вимиканні струму котушки відповідно до (13.10):

$$k = \frac{C_\Phi \cdot \alpha_{1m1}}{H_0}. \quad (13.11)$$

13.2.2 Явище ядерного магнітного резонансу

Якщо на ядра якої-небудь речовини одночасно впливати постійним і змінним високочастотним магнітним полем, то за певного співвідношення 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 наведеного вище витікає, що:

$$2 \cdot \mu_p \cdot B = h \cdot f, \quad (13.12)$$

або

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{4 \cdot \pi}{h} \cdot \mu_p \cdot B = \gamma_p \cdot B, \quad (13.13)$$

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:

$$B = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\gamma_p}. \quad (13.14)$$

Структурна схема установки для визначення індукції постійного магнітного поля подана на рисунку 3.1.3.

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.

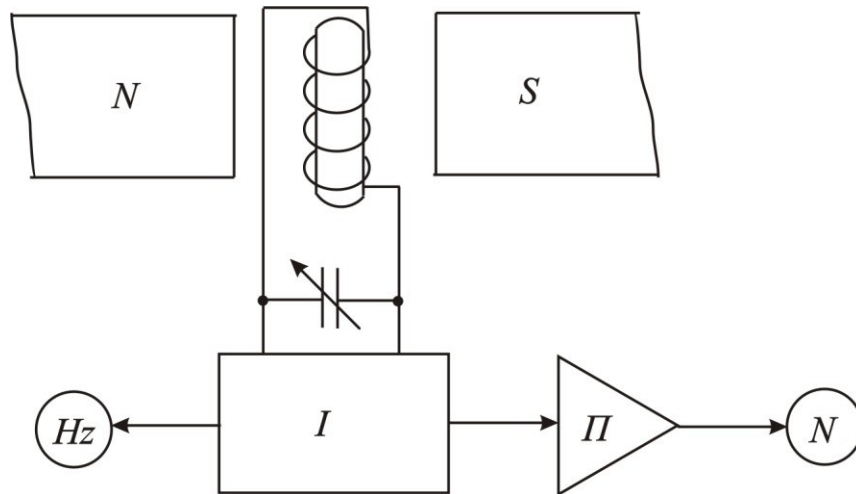


Рисунок 13.3 – Структурна схема установки для визначення індукції постійного магнітного поля

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 із 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.

13.2.3 Ефект 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. 13.4). Для виготовлення перетворювачів Холу зазвичай застосовують напівпровідники (германій, сурм'янистий індій, миш'яковистий індій та ін.), тому що вони дають значно більшу ЕРС Холу, ніж метали.

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

$$E_x \cdot \frac{R_x \cdot I \cdot B}{d}, \quad (13.15)$$

де R_x – постійна Холу;

d – товщина пластини.

З (13.15):

$$B = \frac{E_x \cdot d}{R_x \cdot I}. \quad (13.16)$$

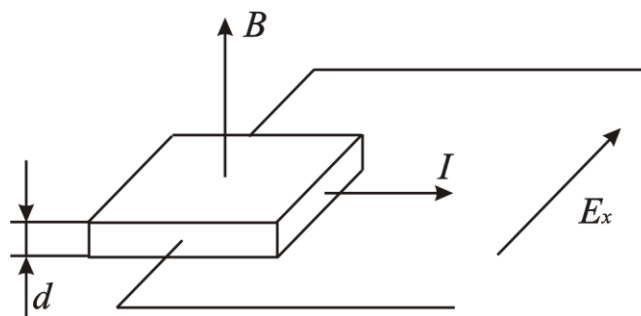


Рисунок 13.4 – Демонстрація ефекту Холу

Основною перевагою перетворювачів Холу є пропорційність ЕРС Холу індукції, малі розміри й маса, можливість їхнього 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 Тл 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», «Гопаз», ТХ-4/1 (рис. 13.5).



Рисунок 13.5 – Зовнішній вигляд тесламетра ТХ-4/1

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

ТЕМА 14 ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

14.1 Класифікація неелектричних величин і вимірювальних перетворювачів

Порівняно з електричними неелектричні величини є найбільш поширеними. Розрізняють такі типи неелектричних величин:

- *величини, що характеризують простір та час* (геометричні розміри, час, параметри руху);
- *механічні величини* (маса та сила, тиск, моменти сили, механічні напруження);
- *теплові величини*, які характеризують тепловий стан тіл (температура, кількість теплоти, теплопровідність);

- *світлотехнічні та енергетичні характеристики світла* (сила світла, світловий потік, яскравість, потужність випромінювання);
- *акустичні величини*, що характеризують різні сторони хвильового руху в різних середовищах (звуковий тиск, гучність звуку, акустичний шум);
- *величини фізичної хімії*, що характеризують фізично-хімічний властивості речовин (хімічний склад, густина розчину, молярна концентрація);
- *величини, що характеризують іонізуюче випромінювання*.

Вимірювання неелектричних величин електричними вимірювальними засобами стає можливим внаслідок попереднього перетворення досліджуваних неелектричних величин у функціонально зв'язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів. Таким чином, в процесі вимірювання неелектричної величини будуть брати участь: первинний вимірювальний перетворювач неелектричної величини в електричну, вторинний електричний вимірювальний прилад, а також пристрої їхнього спряження.

Всі методи вимірювання неелектричних величин можна розділити на *контактні та безконтактні*. При *контактних методах вимірювань* первинний перетворювач безпосередньо контактує з досліджуваним об'єктом. Ці методи порівняно нескладні у реалізації і забезпечують високу чутливість. Проте за контактного методу спостерігається зворотна дія вимірювального перетворювача на параметри досліджуваного об'єкта, що може призвести до значних похибок.

При *безконтактних вимірюваннях* первинний перетворювач безпосередньо не контактує з досліджуваним об'єктом і не впливає на його параметри. Однак на результати вимірювань у цьому випадку значно впливає довкілля, яке відділяє досліджуваний об'єкт від первинного перетворювача.

Можна виділити такі переваги вимірювання неелектричних величин електричними засобами:

– *універсальність*, яка полягає в можливості вимірювань декількох чи навіть великої кількості неелектричних величин за допомогою одного електричного засобу;

– *простота автоматизації вимірювань* в наслідок того, що в електричних колах можна виконувати логічні і цифрові операції;

– *можливість забезпечення високої чутливості*, необхідної точності та швидкодії;

– *дистанційність*, що полягає в можливості вимірювань параметрів досліджуваних об'єктів практично на будь-якій від них відстані.

За фізичними закономірностями, покладеними в основу принципу дії, вимірювальні перетворювачі можуть бути поділені на такі групи:

1. *Механічні пружинні перетворювачі*. В основу принципу дії таких перетворювачів покладені залежності між вхідними механічними зусиллями і викликаними ними переміщеннями чи механічними напруженнями в матеріалі чутливого елемента, що визначаються його пружними властивостями.

2. *Резистивні перетворювачі*. Носієм вимірювальної інформації у резистивних перетворювачах механічних величин є електричний опір, зміна якого може бути наслідком переміщення повзунка реостата чи реохорда в реостатних та реохордних перетворювачах або ж в наслідок тензоефекту в тензорезистивних перетворювачах.

3. *Ємнісні перетворювачі*. В основу принципу дії цих перетворювачів покладена залежність ємності конденсатора від відстані між його електродами, площі їхнього перекриття чи діелектричної проникності середовища між електродами.

4. *П'єзоелектричні перетворювачі*. Принцип дії цих перетворювачів заснований на використанні явища поляризації п'єзоелектрику в наслідок дії на нього механічних зусиль. Різновидом п'єзоелектричних є п'єзрезонансні перетворювачі, принцип дії яких заснований на використанні залежності резонансної частоти п'єзоелемента від значення вимірюваної величини, наприклад, від температури довкілля.

5. *Індуктивні перетворювачі*. Це перетворювачі, у яких використовується залежність повного електричного опору намагнічувальної обмотки від значення комплексного магнітного опору магнітного кола перетворювача, який може бути результатом зміни повітряного проміжку в магнітному колі перетворювача або результатом зміни магнітних властивостей феромагнетику внаслідок дії на нього механічних зусиль, як в індуктивних магнітопружних перетворювачах.

6. *Взаємноіндуктивні (трансформаторні) перетворювачі*. Принцип їхньої дії заснований на використанні залежності магнітного потоку і відповідно наведеної у вторинній обмотці ЕРС від значення комплексного магнітного опору магнітопроводу, який, як і в індуктивних перетворювачах, залежить від зміни повітряного проміжку чи магнітних властивостей феромагнетику, спричинених його механічною деформацією.

7. *Індукційні перетворювачі*. Їхній принцип дії заснований на використанні явища електромагнітної індукції. Вхідними (вимірюваними) величинами таких перетворювачів можуть бути швидкість зміни магнітного потоку або швидкість лінійного або кутового переміщення вимірювальної котушки.

8. *Гальваномагнітні перетворювачі*. Їхній принцип дії базується на використанні гальваномагнітних ефектів Гаусса або Холла. Суть ефекту Гаусса полягає у зміні електричного опору провідника чи напівпровідника при проходженні через нього електричного струму та одночасної дії на нього магнітного поля, а ефект Холла – в появі за названих умов поперечної різниці потенціалів (ЕРС Холла). Основними різновидами гальваномагнітних перетворювачів є відповідно магніторезистивні перетворювачі Холла.

9. *Теплові перетворювачі*. Тепловими називають перетворювачі, в основу принципу роботи яких покладені фізичні ефекти, що визначаються тепловими процесами. Теплові перетворювачі – це переважно перетворювачі температури. Правда, непрямо вони можуть використовуватись для перетворень інших величин, що проявляються через теплові процеси, наприклад, нехімічного складу, концентрації, швидкості руху газів чи рідин тощо. Існують дві основні

групи теплових перетворювачів, які широко застосовуються у вимірювальній техніці. Це – терморезистори, що використовують залежність опору матеріалу від температури, та термоелектричні перетворювачі, в основу принципу дії яких покладена залежність термо-ЕРС термопари від різниці температур.

10. *Електрохімічні перетворювачі.* Принцип дії електрохімічних перетворювачів оснований на залежності електропровідності електролітичної комірки від складу, концентрації, температури чи інших параметрів досліджуваного розчину (електрохімічні резистивні перетворювачі); залежності електродних потенціалів від активності водневих іонів (гальванічні перетворювачі рН-метрів); а також залежності різниці електричних потенціалів на межі розділу твердої та рідкої фаз від швидкості переміщення розчину (електрокінетичні перетворювачі).

11. *Оптичні перетворювачі.* В основу їхнього принципу дії покладена залежність параметрів оптичного випромінювання від значення вимірюваної величини. Остання може діяти безпосередньо на джерело випромінювання, змінюючи інтенсивність його випромінювання, як в оптичних пірметрах, або ж на оптичний канал, впливаючи на параметри оптичного потоку, як, наприклад, у вимірювача оптичної щільності.

12. *Перетворювачі іонізаційного випромінювання.* Принцип дії таких перетворювачів оснований на перетворенні інтенсивності іонізаційного або рентгенівського випромінювання. У перетворювачах іонізаційного випромінювання вихідна електрична величина функціонально зв'язана з інтенсивністю іонізаційного або рентгенівського випромінювання, яка є мірою досліджуваної величини.

14.2 Спряження первинних перетворювачів з електричними засобами вимірювань

Складовими елементами комплексних засобів вимірювань є вимірювальні перетворювачі, пристрої порівняння, пристрої спряження (масштабувальні,

лінеаризувальні, уніфікувальні перетворювачі, універсальні електричні вимірювальні прилади).

Як вимірювальні перетворювачі, так і пристрої спряження, що входять до складного засобу вимірювань, мають свої метрологічні, конструктивні, експлуатаційні та інші технічні характеристики. Завдання спряження цих елементів полягає у виробленні єдиних вимог до цих елементів, виконання яких забезпечує їхню сумісність. Передусім повинна забезпечуватись інформаційна сумісність, під якою розуміють таку властивість засобів, що спрягаються, яка забезпечує узгодженість їхніх вхідних і вихідних сигналів, зокрема, їхніх робочих діапазонів. Це досягається уніфікацією сигналів первинних перетворювачів або застосуванням допоміжних узгоджувальних пристроїв, що вмикаються поміж узгоджувальними засобами вимірювань (перетворювачем та вимірювальним електричним приладом).

Необхідною умовою забезпечення метрологічної сумісності є методологічна сумісність аналізу, нормування, синтезу, ідентифікації та прогнозування похибок засобів, що спрягаються. Це досягається використанням єдиної математичної моделі похибок окремих засобів вимірювань, єдиного способу нормування та подання характеристик.

Засоби вимірювань, які спрягаються між собою, повинні також задовольняти вимогам енергетичної сумісності (узгодженість умов до параметрів джерел живлення), конструктивної сумісності (узгодженість конструктивних параметрів та можливість механічного спряження), експлуатаційної сумісності (узгодженість експлуатаційних характеристик щодо стійкості до дії зовнішніх чинників).

Первинні перетворювачі, зокрема перетворювачі неелектричних величин в електричні, мають зазвичай нелінійну функцію перетворення. Тому під час їхнього спряження з електричними вимірювальними приладами виникає необхідність лінеаризації функції перетворення, тобто одержання лінійної залежності вихідного сигналу засобу вимірювань від значення вхідної вимірюваної величини.

Досягти лінійності функції перетворення первинного перетворювача можна конструкторсько-технологічними прийомами, зокрема використанням спеціальних матеріалів, застосуванням відповідної технології виготовлення або відповідного конструктивного виконання елементів перетворювача. Але частіше вдаються до інших способів лінеаризації, наприклад, побудови нерівномірних шкал в аналогових приладах або ж використання алгоритмічних або структурних методів.

14.3 Вимірювання світлових величин

Слухачам, які навчаються за спеціальністю «Світлотехніка та джерела світла», найбільш цікавими з неелектричних величин є світлотехнічні.

Вимірювання енергетичних величин, що характеризують випромінювання, називається *радіометрією*. Вимірювання енергетичних величин, що характеризують оптичне випромінювання, називається *оптичною радіометрією*. Вимірювання величин, що характеризують випромінювання за зоровим відчуттям, називається *фотометрією*.

Оптична радіометрія як область вимірювань охоплює, крім фотометрії, такі основні види вимірювань, як колориметрія, спектрофотометрія і спектрорадіометрія випромінювання складного спектрального складу. *Колориметрією* називається вимірювання кольору, що ґрунтується на властивостях ока.

Спектрофотометрією називається вимірювання відношення двох спектральних величин, що характеризують випромінювання.

Спектрорадіометрія має справу переважно з вимірюванням спектральної щільності енергетичної величини, що характеризує випромінювання.

Фізичні величини, що характеризують оптичне випромінювання, поділяються на дві системи – енергетичну і світлову.

14.4 Вимірювання сили світла

Найпершим способом вимірювання сили світла є спосіб, заснований на використанні *фотометричної лави* (рис. 14.1). Вимірювання засновано на знаходженні таких відстаней r_1 і r_2 , на яких два джерела, що порівнюються, створюють на двох екранах однакові нормальні освітленості. Після чого можна записати співвідношення:

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}, \quad (14.1)$$

де I_1 і I_2 – сили світла порівнювальних джерел.

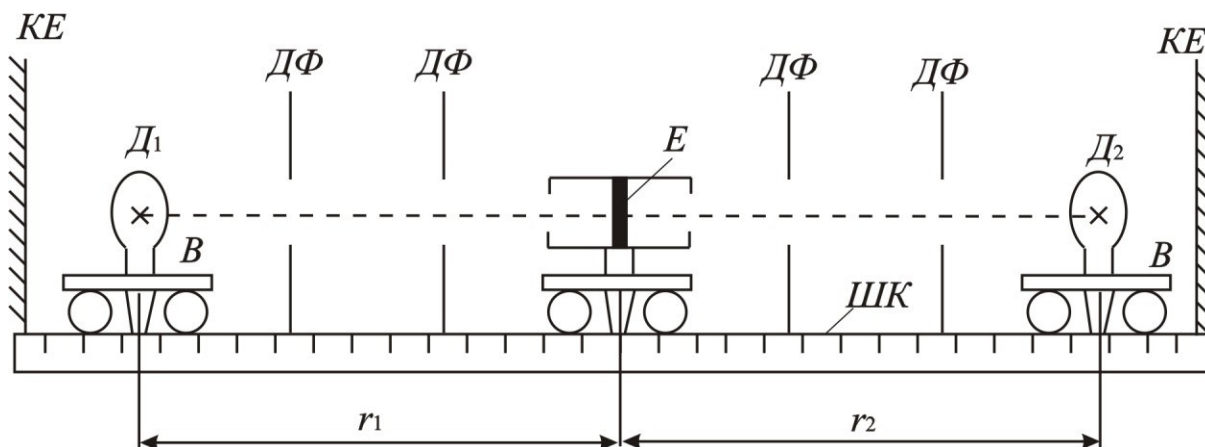


Рисунок 14.1 – Схема фотометричної лави

Фотометрична лава становить станок, головною частиною якого є дві горизонтальні і взаємно паралельні металеві труби. На гладку поверхню однієї з них нанесена лінійна шкала *ШК*. Трубами можуть пересуватися візки *В*, забезпечені вказівниками, що ковзають вздовж шкали. Встановивши положення вказівників, можна визначити відстані r_1 і r_2 від порівнюваних джерел D_1 і D_2 до поверхонь освітлюваного ними білого екрана E . Фотометричні лави виготовляються довжиною від 2,5 м до 5 м.

Для захисту поверхні екрану від зовнішнього засвічування вздовж осі фотометричної лави розташовують ряд чорних діафрагм $D\Phi$, що затримують нахилені до осі пучки світла і пропускають на екран тільки світло від джерел, що беруть участь в експерименті.

Телецентричний метод

Особливістю цього методу є незалежність результату вимірювань від відстані між джерелом і приймачем. Телецентричний метод вимірювання сили світла ґрунтується на можливості відокремлення (з допомогою простих оптичних засобів) і вимірювання світлового потоку $\Delta\Phi$, що поширюється від джерела всередині постійного і малого тілесного кута $\Delta\omega$, і визначенні сили світла джерела у відповідному напрямку.

На рисунку 14.2 показана схема установки для вимірювання сили світла телецентричним методом. На схемі зображено джерело D , силу світла якого потрібно визначити. Випромінювання цього джерела падає на додатну лінзу L , оптична ось якої співпадає з напрямом вимірюваної сили світла. Зазвичай розмір лінзи перевищує розміри джерела. У головній фокусній площині лінзи поміщують прозору перепону $D\Phi$ з круглим отвором O , центр якого співпадає з головним фокусом F лінзи. За отвором O розташований фотоелемент ΦE , підключений до вимірювального приладу $ВП$. Струм i , що протікає через фотоелемент пропорційний світловому потоку джерела.

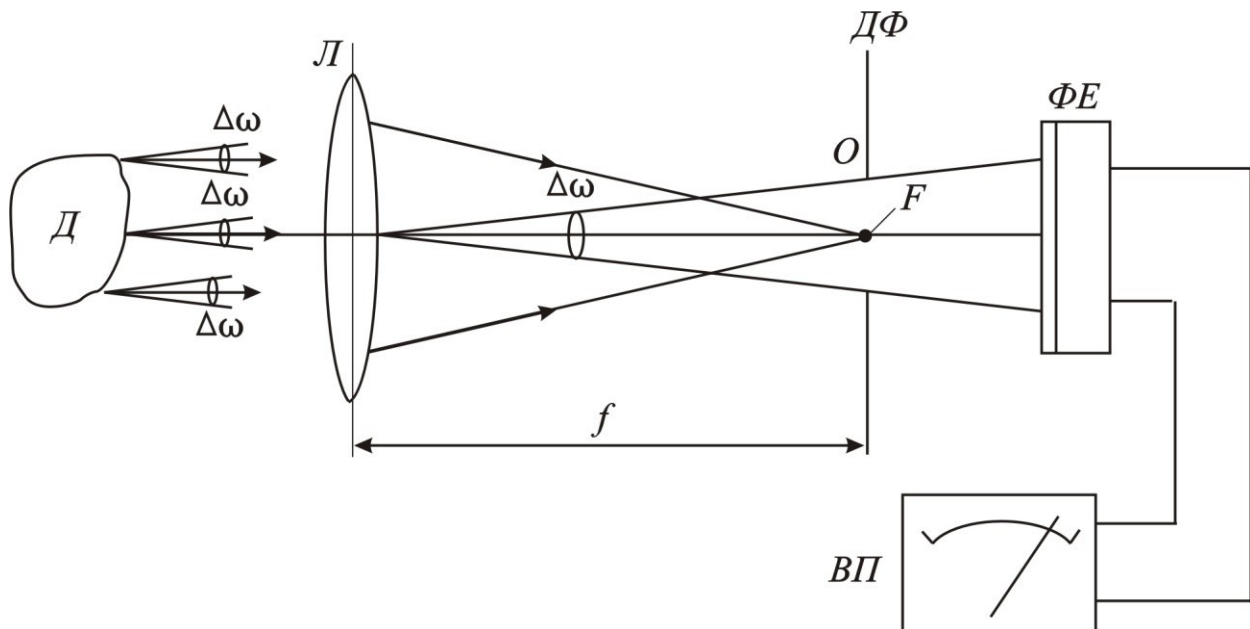


Рисунок 14.2 – Телецентричний метод вимірювання сили світла

Прилади, принцип дії яких заснований на телецентричному методі, називаються свічомірами. За допомогою цих приладів можна вимірювати силу світла джерел, розміри яких не виходять за межі кругового конусу з тілесним кутом $\Delta\omega$, що спирається на діючу площу лінзи L .

14.5 Вимірювання світлового потоку

Для визначення світлового потоку джерела з довільним світлорозподіленням випромінювання в навколишньому середовищі користуються співставленням невідомого світлового потоку несиметричного джерела з попередньо визначеним світловим потоком зразкового джерела. Таке співставлення виконується за допомогою порожнистої кулі достатньо великого діаметра, внутрішня поверхня якої рівномірно покрита білою фарбою, що розсіює світло відповідно до закону Ламберта, тобто за допомогою фотометричної кулі.

Теорія фотометричної кулі показує, що світловий потік, що розсіюється її внутрішньою стінкою, розподіляється абсолютно рівномірно. Тому, якщо всередині порожнистої кулі, стінка якої має у всіх точках однаковий коефіцієнт відбиття ρ , розташувати джерело S (рис. 14.3), яке випромінює світловий потік Φ , то відбитий від стінки кулі K світловий потік $\rho\Phi$ створить у всіх її точках однакову освітленість:

$$E_1 = \frac{\rho \cdot \Phi}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (14.2)$$

де r – радіус кулі.

Другий світловий потік також рівномірно розподілиться стінками кулі і створить додаткову освітленість:

$$E_1 = \frac{\rho \cdot \Phi}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (14.3)$$

і так далі до нескінченності.

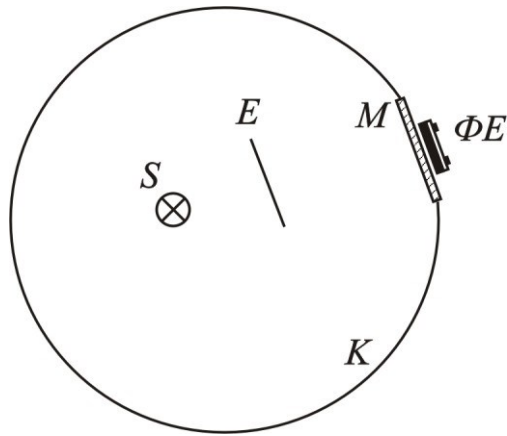


Рисунок 14.3 – Вимірювання світлового потоку фотометричною кулею

Загальна сумарна освітленість в якійсь точці M на зовнішній поверхні кулі:

$$E_3 = E_{дж} + \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{\Phi}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (14.4)$$

де $E_{дж}$ – пряма освітленість, яку створює джерело S в точці M .

Освітленість $E_{дж}$ не буде однаковою у всіх точках, оскільки вона залежить від розташування джерела S всередині кулі і його світлорозподілення. Якщо за допомогою непрозорого екрана захистити малу ділянку стінки біля точки M від потрапляння світла безпосередньо від джерела, то освітленість цієї ділянки:

$$E = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{\Phi}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = a \cdot \Phi, \quad (14.5)$$

де a – коефіцієнт пропорційності, що залежить тільки від властивостей кулі.

Тому, якщо джерело S , що досліджується, з невідомим світловим потоком Φ замінити на зразкове джерело S_0 з відомим світловим потоком Φ_0 , то освітленість в точці M : $E_0 = a \cdot \Phi_0$.

$$E_0 = a \cdot \Phi_0. \quad (14.6)$$

Поділивши (14.5) на (14.6), отримаємо:

$$\Phi = \frac{\Phi_0 \cdot E}{E_0}. \quad (14.7)$$

Встановивши відношення освітленостей E/E_0 , можна визначити світловий потік Φ . Відношення освітленостей в більшості випадків визначається фотоелектричним методом. У стінці кулі біля точки M роблять отвір, що закривається молочним склом, за яким розташовують селеновий фотоелемент ΦE , оснащений світлофільтром. Замкнувши фотоелемент на гальванометр з достатньо малим опором, визначають струми i й i_0 , що встановлюються в колі фотоелемента при освітленостях E та E_0 на молочному склі. Відношення i/i_0 та E/E_0 можна рахувати рівними і вчислити світловий потік за формулою (14.7).

14.6 Вимірювання освітленості

Вимірювання освітленості у багатьох випадках здійснюється за допомогою фотоелектричних люкметрів, що складаються з селенового фотоелемента площиною 10–20 см² і чутливого гальванометра, шкала якого проградуєвана безпосередньо в люксах. Гальванометр з'єднаний з фотоелементом довгим гнучким проводом.

Під час вимірювань фотоелемент люкметра розташовується в тому місці, де повинна бути виміряна освітленість, і орендується так, щоб його світлочуттєва поверхня співпадала з площиною, що контролюється. Зазвичай гальванометр має декілька шкал, що використовуються під час вимірювань різних освітленостей. Виведений перемикач опорів, що входять в електричне коло люкметра, вказує, якою з шкал потрібно користуватися.

Для вимірювання особливо високих рівнів освітленості люкметри забезпечуються оптичними ослаблювачами світла, що надіваються на фотоелемент.

Метод вимірювання освітленості за допомогою люксметра є достатньо простим, але має високу похибку, десь близько 10 %.

Серед фотоелектричних люксметрів можна виділити люксметр Ю116 (рис. 14.4, а), що має діапазон вимірювань освітленості від 0,1 лк до 100 000 лк і клас точності 10,0.

Останнім часом на зміну аналоговим люксметрам приходять електронні люксметри. На (рис. 14.4, б) показаний електронний люксметр MS-1300, що виготовляється фірмою «Voltcraft».



Рисунок 14.4 – Зовнішній вигляд люксметрів: а – фотоелектричного Ю116; б – електронного MS-1300

Прилад MS-1300 призначений для вимірювання освітленості у виробничих, жилих і адміністративних приміщеннях, має межі вимірювань від 0,1 лк до 50 000 лк, які вкладаються у 4 діапазони. Клас точності приладу залежить від обраного діапазону і складає 5,0 для двох перших діапазонів і 10,0 – для двох останніх.

14.7 Вимірювання яскравості

Яскравість характеризує світіння поверхні предмету в якомусь напрямку і необхідність її вимірювання виникає доволі часто. Завдання цього роду можуть

бути достатньо різноманітними. Передусім мова може йти про вимірювання яскравості джерела світла як дуже протяжного, так і дуже малого. В іншому випадку буває необхідно визначити яскравість освітленого предмета, що розсіює світло, розміри якого можуть бути будь-якими, а поверхня – неоднорідною. Вимірювання яскравості виконується на основі однієї з двох відомих залежностей. Перша з них зв'язує середню яскравість джерела в заданому напрямку з його силою світла I в тому самому напрямку і площею його проєкції σ на площину, перпендикулярну до обраного напрямку:

$$\bar{L} = \frac{I}{\sigma}. \quad (14.8)$$

Сила світла джерела визначається одним з описаних вище способів, але виникають труднощі з вимірюванням площі проєкції джерела.

Частіше користуються іншим способом, зв'язаний з прямою пропорційністю між яскравістю пучка променів і світловим потоком, який проходить між двох діафрагм. Прилад, призначений для вимірювання яскравості пучка і заснований на вимірюванні світлового потоку, називається *яскравоміром*.

Принципова схема найпростішого яскравоміра подана на рисунку 14.5. Однією з головних його частин є ахроматичний об'єктив OB , що зображує ділянку ab поверхні S , що світиться, на світлочуттєвій поверхні $a'b'$ фотоелектричного приймача ΦE , яка прилягає до отвору в непрозорому екрані $Д\Phi$. Приймач ΦE приєднаний до електровимірювального приладу $ВП$, покази якого пропорційні світловому потоку Φ , що падає на поверхню приймача. Пучок, що розходить з точки O предмета в межах апертурного кута $2u$, обмежується оправою об'єктива OB , яка разом з отвором у непрозорому екрані $Д\Phi$ визначає сукупність променів, що переносять світловий потік від джерела S до приймача ΦE .

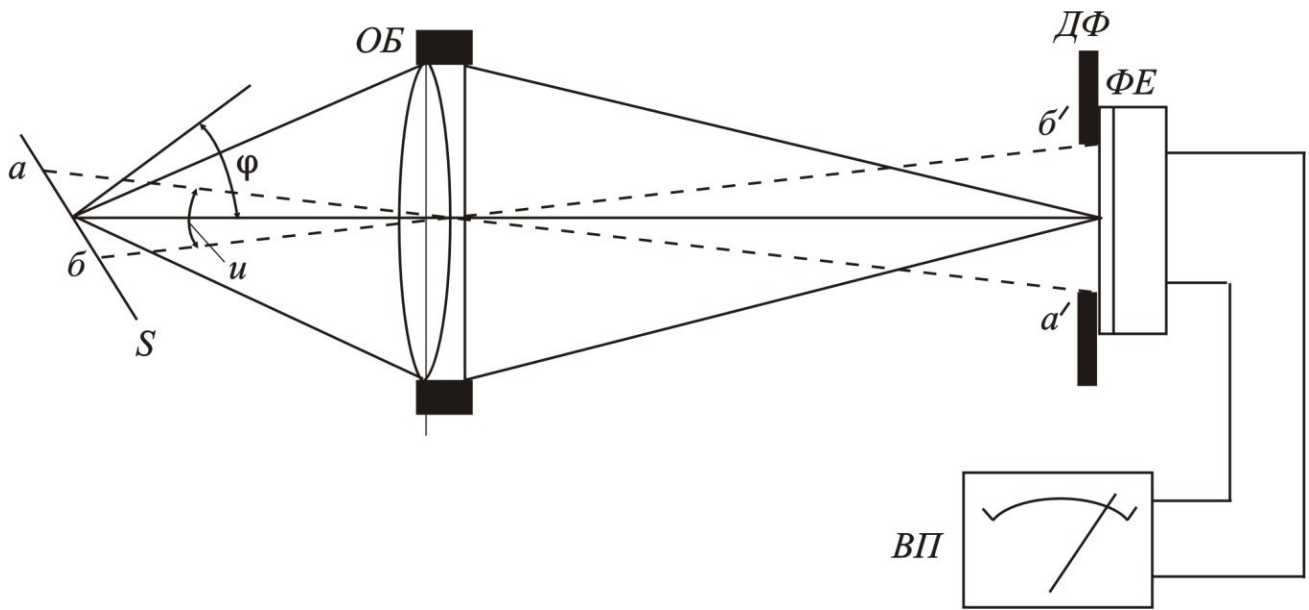


Рисунок 14.5 – Схема фотоелектричного яскравоміра

Яскравість пучка буде визначатися як відношення світлового потоку Φ до геометричного фактора системи двох отворів G

$$L = \frac{\Phi}{G} = k \cdot n, \quad (14.9)$$

де n – відлік за шкалою приладу;

k – коефіцієнт пропорційності.

Для того щоб користуватися цим приладом, його потрібно проградувати, визначивши відлік за шкалою n_0 , відповідний відомої яскравості L_0 . Тоді:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{n}{n_0}, \quad (14.10)$$

звідси можна знайти значення яскравості L .

Останнім часом поширилися електронні яскравоміри. Наприклад, яскравомір «ТЕНЗОР-28», «Аргус-02» (рис. 14.6) тощо.



Рисунок 14.6 – Зовнішній вигляд яскравоміра «Аргус-02»

Яскравомір «ТЕНЗОР-28», призначений для вимірювання яскравості екранів електронно-променевих трубок, має діапазон показань від 0 кд/м² до 2 000 кд/м² і клас точності 7,0. Яскравомір «Аргус-02» призначений для вимірювання яскравості протяжних об'єктів, має діапазон показань від 0,1 кд/м² до 10⁵ кд/м² і клас точності 10,0.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Основи метрології та електричних вимірювань [Електрон. ресурс] : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Електрон. текст. дані. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 522 с. – Режим доступу: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/220/403/444-1?inline=1/>, вільний (дата звернення: 25.01.2024). – Назва з екрана.

2. Основи метрології та електричні вимірювання: навч. посіб. / [М. М. Дорожовець та ін.] ; за наук. ред. д-ра техн. наук, проф. Б. І. Стадника; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2011. – 370 с.

3. Аналогові вимірювальні прилади. Основи теорії та уніфікований практикум : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготов. «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / [В. К. Гусельніков та ін.] ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Наук.-метод. центр вищ. освіти, Нац. техн. ун-т «Харків політехн. ін-т». – Харків : Підручник НТУ «ХП», 2011. – 229 с.

4. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / [Є. С. Поліщук та ін.]; за ред. проф. Є. С. Поліщука ; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». – 2-ге вид., переробл. і допов. – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2012. – 534.

5. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук [та ін.] ; Вінниц. нац. техн. ун-т. – Херсон : Олді-плюс, 2013. – 537 с.

ДОДАТОК А






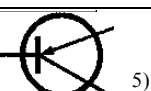
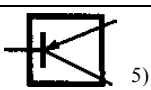

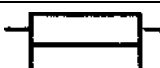
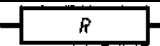
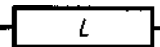







Таблиця А.1 – Позначення маркування приладів і допоміжних частин

| 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⁾ |  |
| В-6 | Один вимірювальний елемент (Е) для трипровідного кола | 3 ~ 1E ²⁾ |  |
| В-7 | Один вимірювальний елемент (Е) для чотирипровідного кола | 3N ~ 1E ²⁾ |  |
| В-8 | Два вимірювальних елемента (Е) для трипровідного кола з несиметричними навантаженнями | 3 ~ 2E ²⁾ |  |
| В-9 | Два вимірювальних елемента (Е) для чотирипровідного кола з несиметричними навантаженнями | 3N ~ 2E ²⁾ |  |
| В-10 | Три вимірювальних елемента (Е) для чотирипровідного кола з несиметричними навантаженнями | 3N ~ 3E ²⁾ |  |
| С. Безпека (для застосування дивись ДСТ Р 51350) | | | |
| D. Положення під час 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° |  | |









Продовження таблиці А.1

| Е. Клас точності | | |
|--|---|---|
| E-1 | Позначення класу точності (наприклад, 1), окрім тих випадків, коли нормуюче значення відповідає довжині шкали або значенню, що показується, або інтервалу вимірювання | 1 |
| 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 |  |
| Ф. Основні позначення (див. також [3] і [4]) | | |
| F-1 | Магнітоелектричний прилад з рухомою котушкою |  |
| F-2 | Магнітоелектричний логометр (вимірювач відношень) |  |
| F-3 | Магнітоелектричний прилад з рухомим магнітом |  |
| F-4 | Магнітоелектричний логометр (вимірювач відношень) з рухомим 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 із 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) |  |

Продовження таблиці А.1

| | | |
|------|--|---|
| F-15 | Біметалевий прилад |  |
| F-16 | Електростатичний прилад |  |
| F-17 | Вібраційний прилад |  |
| 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 |  а б о |
| F-26 | Додатковий повний опір |  о |
| F-27 | Електричний екран |  |
| F-28 | Магнітний екран |  |
| F-29 | Астатичний прилад | A s t |
| F-30 | Напруженість магнітного поля, виражена в кА/м, що викликає зміну показань, відповідну позначенню класу точності (наприклад 2 кА/м) |  |
| F-31 | Затискач «земля» (основне позначення) |  6) (5017) ¹⁾ |
| F-32 | Регулятор нуля (інтервалу вимірювання) |  |
| F-33 | Див. окремий документ |  |

Продовження таблиці А.1


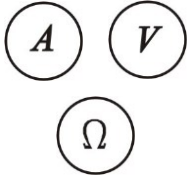



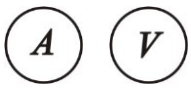
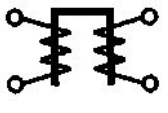
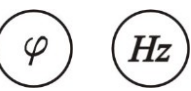

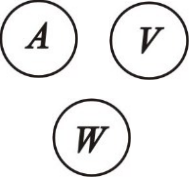



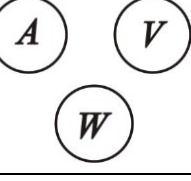




| | | |
|------|---|---|
| F-34 | Напруженість електричного поля, виражена в кВ/м, що спричиняє зміну показань, відповідну позначенню класу точності (наприклад, 10 кВ/м) |  |
| F-35 | Загальна допоміжна частина |  |
| F-37 | Феромагнітна опорна площина товщиною X мм | F e X |
| F-38 | Феромагнітна опорна площина будь-якої товщини | F e |
| F-39 | Неферомагнітна опорна площина будь-якої товщини | N f e |
| F-42 | Затискач корпусу або шасі |  (5 0 2 0) 1) |
| 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 |  |

Закінчення таблиці А.1

- 1) Наведені в цій графі числа – номери позначень за [3].
- 2) Символи, отримані з символу 02-02-04 за [4].
- 3) Для інформації.
- 4) Символ Е-2 – для інформації. Його не варто застосовувати в нових розробках приладів.
- 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.
- 6) Символ F-31 не рекомендується. Замість нього варто застосовувати один з більш конкретних символів F-42, F-43, F-44 або F-45.
- 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.

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Способи застосування вимірювальних приладів різних систем

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

Електронне навчальне видання

ТУГАЙ Дмитро Васильович,
ЄГОРОВ Олексій Борисович,
КОРНЕЛЮК Сергій Іванович,
ФОРКУН Яна Борисівна

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)

Відповідальний за випуск *О. Б. Єгоров*
Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *Є. Г. Панова*

План 2023, поз. 109Л

Підп. до друку 22.07.2024. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 9,0.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.