

ЛЕКЦІЯ № 3. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПРИЛАДІВ

У процесі експлуатації апаратури вимірюють силу струму, напругу, опір, потужність, частоту й витрату електричної енергії. Для цього застосовують різні електровимірювальні прилади.

Вимірювання — це визначення розмірів фізичної величини дослідним шляхом за допомогою вимірювальних приладів.

Багато електровимірювальних приладів мають рухоми й нерухоми частини. Рухома частина, до якої входять котушка або сталевий якір, механічно об'єднана зі стрілковим покажчиком та зворотними пружинами з фосфористої бронзи (рис. 61).

Принцип дії вимірювальних приладів незалежно від їхнього призначення зводиться ось до чого: електричний струм, проходячи через прилад, обумовлює появу обертаючого моменту, який дає змогу подолати протидію спіральних пружин 2 (див. рис. 61), рухома частина повертається на певний кут α . При цьому стрілка 3, перемістившись по шкалі 4, покаже значення вимірюваної величини. Коли прилад вимикається, обертаючий момент зникає і рухома частина завдяки пружності спіральних пружин 2 повертається у вихідне положення.

У разі зміни температури навколишнього середовища пружність вворотних пружин теж змінюється, а це призводить до деякого повороту рухомої частини. Проте перед початком вимірювань стрілка приладу

має знаходитись напроти вихідної (нульової) поділки **шкали**. Стрілку встановлюють у це положення коректором /.

Згідно з умовами експлуатації рухома частина приладу повинна швидко заспокоюватися, що забезпечується застосуванням повітряного або магнітного заспокоювача. У повітряному заспокоювачі (рис. 62, а) використовується

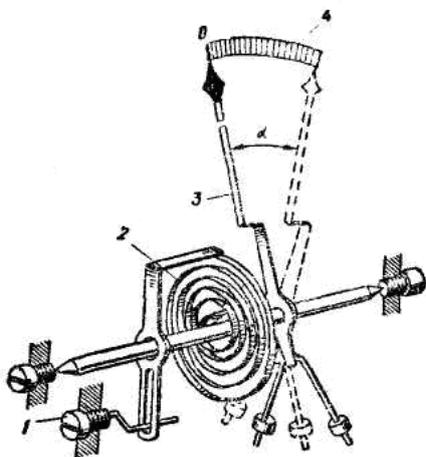
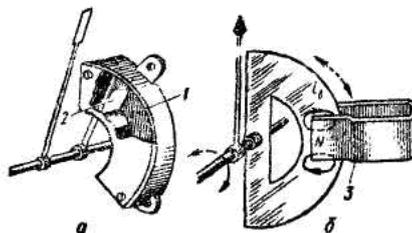


Рис. 61. Будова рухомої частини електровимірювального приладу.

Рис. 62. Будова заспокоювача: а — повітряного; б — магнітного; 1 — камера повітряного заспокоювача; 2 — поршень; 3 — постійний магніт.



гальмування рухомої системи внаслідок стиснення або розрідження повітря в камері заспокоювача, а в магнітному (рис. 62, б) застосовано принцип магнітного гальмування (під дією

вихрових струмів силою i_B). Щоб зменшити тертя й підвищити точність вимірювання, у деяких приладах вісь рухомої частини закріплюють на кернах у підп'ятниках із високотвердих каменів (рубіну, сапфіру, агату).

Вимірювальні прилади розрізняють за призначенням, родом вимірюваного струму, принципом дії, класом точності, а також за формою корпусу, положенням під час вимірювання та характером застосування.

За призначенням прилади поділяються на амперметри, вольтметри, омметри, ватметри, лічильники, частотоміри тощо.

Вимірювальні прилади можна застосовувати в колах змінного або постійного струму. Але є прилади, призначені для вмикання в кола і змінного і постійного струмів.

За принципом дії електровимірювальні прилади належать до таких найпоширеніших систем: електромагнітної, магнітоелектричної, електродинамічної, індукційної, електростатичної, термоелектричної та вібраційної.

У зв'язку з тим що абсолютно точних приладів немає, їх покази дещо відрізняються від дійсних значень вимірюваної величини.

Різниця між показом приладу і дійсним значенням вимірюваного параметра називається абсолютною похибкою. Наприклад, якщо напруга джерела становить 100В, а вольтметр зі шкалою на 150 В, ввімкнений в це коло, показує 103 В, то абсолютна похибка $\Delta A = U_n - U_{дж} = 103 - 100 = 3$ В.

Відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваного параметра називається відносною похибкою приладу: $\gamma_{від} = (\Delta A/A) \cdot 100$ %. Якщо абсолютна похибка дорівнює 3 В, а значення вимірюваної величини становлять 50 і 100 В, то відносна похибка для першого вимірювання буде $(3/50) \cdot 100$ % = 6 %, а для другого вимірювання — $(3/100) \cdot 100$ % = 3 %. Виходить, що відносна похибка на початку шкали більша, ніж у кінці. Це треба враховувати, вибираючи межу вимірювань в універсальних вимірювальних приладах (авометрах). Найменша похибка у вимірюваннях — при використанні останньої третини шкали.

Отже, точність стрілкових вимірювальних приладів (найпоширеніших) оцінювати за їх відносною похибкою незручно, оскільки абсолютна похибка у них приблизно однакова вздовж усієї шкали. Зі зменшенням значення вимірюваного параметра швидко зростає відносна похибка. Для оцінки точності стрілкових вимірювальних приладів служить їх зведена похибка, яка дорівнює відношенню абсолютної похибки показів ΔA до значення, що відповідає найбільшому (номінальному) показу приладу A_n у процентах: $\gamma_{зв} = (\Delta A/A_n) \cdot 100$ %.

У нашому випадку абсолютна похибка — 3 В, найбільший показ приладу — 150 В і зведена похибка $\gamma_{зв} = (3/150) \cdot 100$ % = 2 %. За нормальних експлуатаційних умов (температура 20°C, правильне встановлення, відсутність зовнішніх магнітних полів і великих ферромагнітних мас) зведена похибка називається основною похибкою приладу.

За ступенем точності вимірювальні прилади поділяються на вісім класів: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Цифри означають основну похибку в процентах.

Прилади класів точності 0,05 та 0,1 вважаються контрольними; 0,2 і 0,5 — лабораторними; 1, 1,5 і 2,5 — технічними; 4 — навчальними. Контрольні прилади обладнані дзеркальною шкалою та ножевидною стрілкою. Лабораторні прилади мають ножевидну стрілку, але дзеркальної шкали у них може й не бути. У технічних та навчальних приладів є списоподібна стрілка, але немає дзеркальної шкали.

Дзеркальна шкала, яка являє собою пластину з посрібленого скла, розташовану під дугоподібним вирізом шкали, забезпечує високу точність зняття показів приладу. Під час визначення показів приладу із дзеркальною шкалою око спостерігача має бути розташоване так, щоб стрілка закривала своє зображення у дзеркальній шкалі.

Таблиця 2. Умовні позначки на шкалах електровимірювальних приладів

Система приладу	Умовна позначка	Знак на шкалі приладу	
Електромагнітна		Струм:	
		постійний	
		змінний	
Магнітоелектрична			
Електродинамічна		Затискач:	
		загальний	
Індукційна		з'єднаний з корпусом	
Вібраційна		для заземлення	
			
Випрямна		Встановлення приладу:	
		вертикальне	
Термоелектрична		горизонтальне	
		під кутом	
Феродинамічна			
Електростатична		Вимірювальне коло ізольоване від корпусу й випробуване напругою 2 кВ	

За формою корпусу прилади бувають круглі, квадратні, прямокутні та сектороподібні; за характером застосування — стаціонарні (жорстко закріплені на місці встановлення) та переносні; за положенням під час вимірювання — вертикальні (\perp), горизонтальні (—) або такі, що встановлюються під певним кутом (\angle).

Промисловість випускає електровимірювальні прилади трьох експлуатаційних груп (А, Б та В), що характеризують допустиму температуру навколишнього середовища, за якої можна експлуатувати. Допустима температура навколишнього середовища для групи А - $0...+35\text{ }^{\circ}\text{C}$; групи Б - $30...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; групи В₁ - $40...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$; групи В₂ - $50...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Належність приладу до експлуатаційних груп Б і В зазначається на шкалі. Прилади експлуатаційної групи А позначок на шкалі не мають. Умовні позначення деяких приладів наведено в табл. 2.

На шкалі вимірювальних приладів умовними позначками й цифрами наводяться такі дані: рід струму, для якого призначений прилад, система приладу, напруга ізоляції, положення під час вимірювань, клас точності, а також рік випуску, номер приладу та його належність до експлуатаційної групи. Наприклад, вимірювальний прилад, шкалу якого зображено на рис. 63, можна охарактеризувати так: вольтметр (V) для вимірювання змінної напруги в межах від 0 до 150 В, електромагнітної системи, вертикального положення, класу точності 1,0. Ізоляція приладу випробувана на напругу 2 кВ; рік випуску 1975; заводський номер 3275; експлуатаційна група Б.

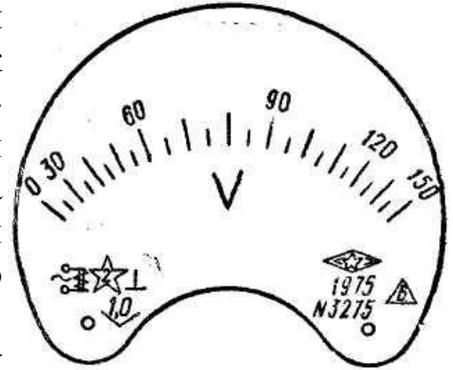
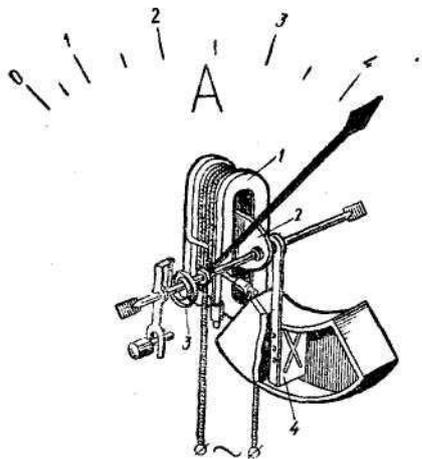


Рис. 63. Шкала вольтметра.

Експлуатуючи прилади, потрібно дотримуватись таких основних, правил перед ввімкненням приладу стрілку треба встановити коректором на нульову поділку шкали; прилад слід вмикати в коло того роду струму, для якого він призначений; під час вимірювань корпус приладу повинен займати положення, яке відповідає його нормальному встановленню.

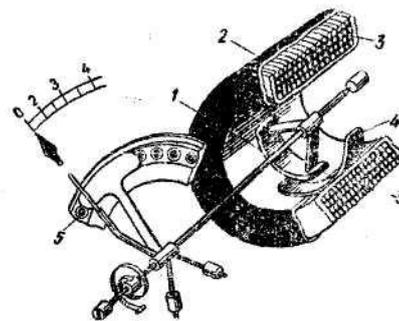
2. ПРИЛАДИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ

Електромагнітні вимірювальні прилади застосовують для вимірювання сили струму або напруги в колах змінного чи постійного струму. Прилади цього типу



△ Рис. 64. Будова електромагнітного приладу з плоскою котушкою.

Рис. 65. Будова електромагнітного приладу з круглою котушкою.



промисловість випускає у двох конструктивних варіантах: з плоскою та круглою котушкою.

Дія електромагнітного приладу з плоскою котушкою ґрунтується на принципі втягування феромагнітного осердя в

котушку зі струмом. Такий прилад (рис. 64) являє собою котушку 1, намотану на каркас з щілиноподібним отвором. Рухома частина приладу складається з

осі зі стрілкою, несиметрично закріпленого осердя 2 та зворотної пружини 3. Для швидкого заспокоєння стрілки відносно положення рівноваги служить заспокоювач із повітряним гальмуванням 4.

Якщо прилад увімкнути в мережу, то по котушці пройде струм і магнітне поле, яке виникає при цьому, втягне осердя всередину котушки. Осердя закріплене на осі несиметрично, тому рухома частина приладу повертається на деякий кут. Рухома частина повертатиметься доти, поки обертаючий момент, утворений струмом, не зрівноважиться протидіючим моментом спіральної пружини.

Кут повороту рухомої частини залежить від сили, з якою осердя втягується всередину котушки. Ця сила прямо пропорційна силі струму I та магнітній індукції B поля котушки: $F = kBI$, де k — коефіцієнт пропорційності.

Оскільки за відсутності насичення магнітна індукція прямо пропорційна силі струму, то кут повороту рухомої частини буде прямо пропорційний квадратові сили струму. У цьому разі шкала приладу має бути квадратичною. Проте наявність у приладі феромагнітного осердя ускладнює цю залежність, внаслідок чого шкала електромагнітних вимірювальних приладів нерівномірна. Надаючи осердю спеціальної форми та змінюючи його розташування відносно котушки, можна добитися деякого зменшення нерівномірності шкали в більшій її частині, крім початкових поділок, які залишаються дуже стисненими.

У котушках електромагнітних вольтметрів велика кількість (2000... 10 000) витків проводу діаметром 0,08...0,1 мм. У котушках амперметрів невелика кількість витків товстого мідного проводу круглого або стрічкового перерізу. Зовнішні магнітні поля виявляють великий вплив на роботу електромагнітного приладу, але завдяки феромагнітному кожухові цей вплив значно послаблюється.

У приладі з круглою котушкою (рис. 65) всередині неї розміщені два осердя: рухоме 1, жорстко закріплене на осі приладу разом зі стрілкою, та нерухоме 4. Коли по котушці 3 протікає струм, який збуджує магнітне поле, кінці осердя намагнічуються з однаковою полярністю і відштовхування їхніх однойменних полюсів створює обертаючий момент. Рухоме осердя 1, відштовхуючись від нерухомого 4, повертає вісь зі стрілкою на деякий кут. Для послаблення впливу зовнішніх магнітних полів котушка забезпечена феромагнітним екраном 2. Прилад обладнано магнітним заспокоювачем 5.

У магнітному полі електромагнітного приладу відносно невелика кількість сталі, і велика частина магнітного потоку проходить у повітрі. Через це вимірювальний механізм електромагнітної системи має малу чутливість, отже, важко виготовити амперметр на низьку силу струму (до 0,5 А) або вольтметр на низьку напругу (менше 10 В).

Здатність приладу працювати в колах змінного і постійного струму пояснюється тим, що зміна напрямку струму в котушці призводить до перемагнічування осердь, внаслідок чого напрямок обертаючого моменту не міняється. У разі змінного струму прилад показує діючі значення струму або напруги. Потужність, яку споживають електромагнітні прилади від мережі, становить від 2 до 8 Вт.

До переваг електромагнітних приладів слід віднести їхню простоту, дешевизну, надійність в експлуатації, здатність витримувати короточасні перевантаження, а також придатність для вимірювання в колах змінного й постійного струму.

Недоліками приладів електромагнітної системи є порівняно низька точність (клас точності — 1; 1,5; 2,5), нерівномірність шкали, досить велика споживана потужність, залежність показів від частоти струму та впливу зовнішніх магнітних полів.

3. ПРИЛАДИ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

Прилади магнітоелектричної системи застосовують для вимірювання сили струму й напруги в колах постійного струму. Робота приладів магнітоелектричної системи ґрунтується на взаємодії магнітного поля та провідника зі струмом.

Нерухома частина приладу (рис. 66) складається з постійного магніту 3 та сталевого циліндра 2. Між полюсами магніту й сталевим циліндром є кільцевий повітряний зазор, у якому утворюється сильне й практично однорідне магнітне поле. Рухома частина приладу являє собою котушку, виконану з тонкого проводу на легкій алюмінієвій рамці 1, яка вільно обертається (на двох напівосях) у кільцевому повітряному зазорі. До передньої напівосі прикріплена стрілка з противагами 4, призначеними для зрівноважування рухомої системи приладу. Протидіючий момент утворюється двома спіральними пружинами, через які на рамку підводиться електричний струм.

Якщо ввімкнути прилад, то по котушці пройде струм і виникне механічна сила, яка згідно з правилом лівої руки повертатиме рамку на певний кут. Ця сила залежить від магнітної індукції B , сили струму в котушці I , кількості витків ω та активної довжини l провідника: $F = 2BIl\omega$. Через те що магнітна індукція, активна довжина та кількість витків — у кожному конкретному типі приладу величини сталі, то кут повороту рамки обумовлюватиметься лише силою струму, що протікає по котушці приладу, та протидіючим моментом поворотних пружин. Тому у приладів магнітоелектричної системи шкала рівномірна.

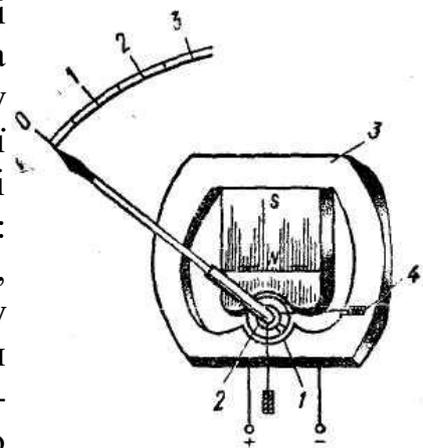


Рис. 66. Будова приладу магнітоелектричної системи.

Коли рамка повертається у магнітному полі, в її витках індукується ЕРС, напрямок якої визначається за правилом Ленца. Струм, що виникає під впливом ЕРС, обумовлює появу протидіючої сили, яка сприяє швидкому заспокоюванню рухомої частини приладу. Завдяки цьому відпадає потреба в заспокоювачі.

Прилади магнітоелектричної системи полярні (тобто мають додатний і від'ємний затискачі), а в колі змінного струму не дають показів. У разі протікання по котушці змінного струму обертаючий момент із частотою струму змінює свій напрямок. Внаслідок інерції рухома частина не встигатиме коливатися з частотою струму, тону залишиться нерухомою і прилад не дасть показів.

Завдяки високій точності, чутливості, рівномірній шкалі, невеликому споживанню енергії ($10^{-4} \dots 10^{-6}$ Вт), швидкому заспокоєнню рухомої частини та низькій чутливості до зовнішніх полів широко застосовуються такі прилади цієї системи, як вольтметри, мілі- та мікроамперметри, а також універсальні прилади (авометри).

До недоліків приладів цієї системи належать порівняно висока вартість, чутливість до перевантажень та придатність тільки для кіл постійного струму. Останній недолік можна усунути, якщо ввімкнути прилад через напівпровідниковий вентиль, але в цьому разі прилад уже відноситиметься до випрямної системи.

4. ПРИЛАДИ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ

Прилади електродинамічної системи застосовують для вимірювання напруги, сили струму та потужності в колах змінного і постійного струму.

Робота електродинамічних приладів ґрунтується на взаємодії провідників зі струмами. У складі приладу (рис. 67) є нерухома котушка 1 а невеликою кількістю витків товстого дроту та рухома котушка 2 з великою кількістю витків тонкого дроту, розміщена всередині нерухомої. На осі рухомої котушки закріплені стрілка 5 і пружини 4, призначені для підведення струму і створення проти-діючого моменту. Нижній кінець стрілки закінчується поршнем 3 повітряного заспокоювача. У зв'язку з чутливістю приладу до зовнішніх магнітних полів застосування заспокоювача в цій системі неприпустиме.

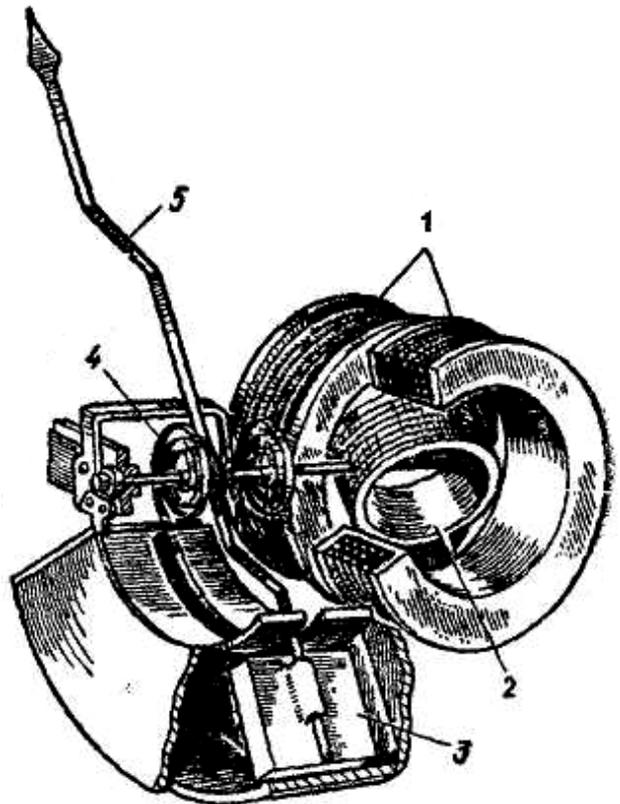


Рис. 67. Будова приладу електродинамічної системи.

Якщо прилад ввімкнути в коло, то по котушках протікатиме струм, і магнітні поля, що виникають при цьому, обумовлюватимуть появу електродинамічної сили, яка прагнучиме повернути рухома частину так, щоб магнітні поля обох котушок збігалися за

напрямок. Припустимо, що через котушки приладу протікають струми однакової сили. Тоді сила взаємодії котушок (і обертаючий момент) будуть прямо пропорційні квадратів сили струму: $F = KI^2$. Тому в електродинамічних амперметрів шкала нерівномірна.

У приладі, ввімкненому в мережу змінного струму, напрямок обертаючого моменту не зміниться, оскільки напрямок струму змінюється одночасно в обох котушках. У колах змінного струму прилади цієї системи показують діючі значення вимірюваної величини.

У разі використання приладу для вимірювання напруги рухому і нерухому котушки з'єднують послідовно. Таке ж з'єднання застосовують для вимірювання невеликих сил струмів (до 0,5 А). Щоб вимірювати великі сили струмів, котушки приладу з'єднують паралельно. Коли вимірюють потужність, нерухому котушку вмикають послідовно, а рухому — паралельно. У останньому випадку через нерухому котушку протікатиме струм навантаження, а через рухому — струм, сила якого прямо пропорційна напрузі на навантаженні, що обумовить виникнення обертаючого моменту, прямо пропорційного потужності, що споживається навантаженням ($P = UI$). З цієї причини шкала електродинамічних ватметрів рівномірна.

Переваги електродинамічних приладів: придатність для вимірювання в колах змінного й постійного струму; можливість використання для вимірювання напруги, сили струму та потужності; висока точність; рівномірність шкали (у ватметрів). Недоліки: порівняно велике споживання потужності (при вимірюванні сили струму й напруги); чутливість до зовнішніх магнітних полів і перевантажень; висока вартість.

Електродинамічні прилади зі сталевим осердям називаються феродинамічними. Проте з застосуванням сталі знижується точність приладу внаслідок впливу гістерезису та вихрових струмів. Тому прилади феродинамічної системи для точних вимірювань непридатні. Вони застосовуються переважно як реєструючі прилади та щитові ватметри.

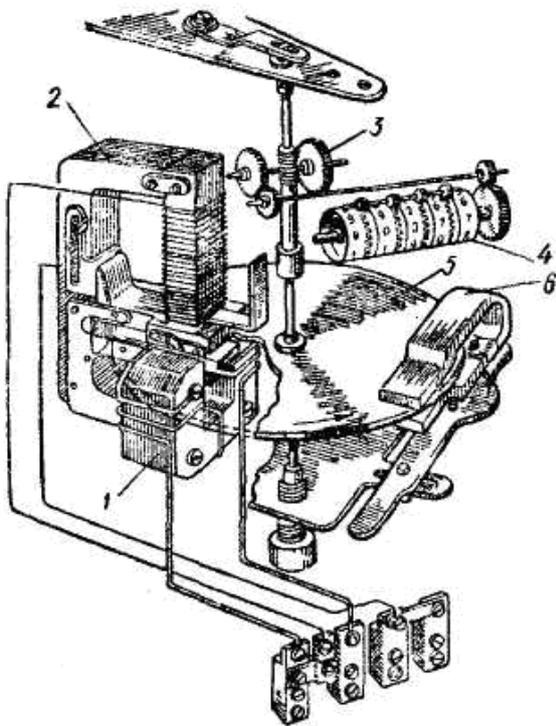
5. ПРИЛАДИ ІНДУКЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Прилади індукційної системи служать для вимірювання витрат електричної енергії в колах змінного струму. Робота індукційного лічильника ґрунтується на взаємодії вихрових струмів з обертовим магнітним полем. Основними деталями індукційного лічильника (рис. 68) є два електромагніти 1 і 2, рухомий алюмінієвий диск 5, редуктор 3, лічильний механізм 4 та гальмівний магніт 6.

У магнітної системи електромагнітів 1 і 2 є повітряні зазори, причому котушка електромагніту 1 з'єднується з навантаженням послідовно, а котушка електромагніту 2 — паралельно. За певного розміщення електромагнітів між їхніми полюсами утворюється обертове магнітне поле, в якому вільно обертається алюмінієвий диск. Обертове магнітне поле, пронизуючи алюмінієвий диск, індукує в ньому вихрові струми. Внаслідок взаємодії вихрових струмів з обертовим магнітним полем виникає механічна сила, яка обертає диск 5. Сила взаємодії між вихровими струмами й обертовим магнітним

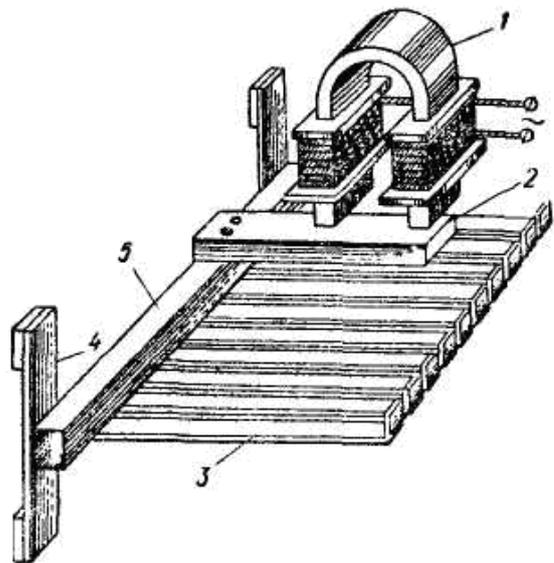
полем прямо пропорційна добутковій миттєвій значенні сили струму на напругу, тобто потужності струмоприймачів: $M = kP$, де k — сталий коефіцієнт.

Щоб швидкість обертання диска була прямо пропорційна потужності струмоприймачів, застосовано гальмівний магніт 6. У диску під час обертання його між полюсами гальмівного магніту індукуються вихрові струми, які, взаємодіючи з магнітним полем магніту, утворюють протидіючий момент, прямо пропорційний частоті обертання диска. Чим швидше обертається диск, тим більша сила його гальмування. Частота обертання диска стає сталою, коли обертаючий момент зрівноважується гальмівним моментом. Лічильний механізм приладу вимірює кількість обертів диска, тобто параметр, прямо пропорційний енергії, витрачаної на роботу струмоприймача.



◁ Рис. 68. Лічильник електричної енергії.

Рис. 69. Будова частотоміра вібраційної системи.



6. ПРИЛАДИ ВІБРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Прилади вібраційної системи призначаються для вимірювання частоти змінного струму. Дія вібраційних приладів ґрунтується на використанні явищ електромагнетизму й механічного резонансу. Кожна механічна система, яка здатна виконувати коливальні рухи, має певну частоту власних коливань, яка обумовлюється масою та пружністю системи. У разі резонансу, тобто коли збігаються частоти власних коливань системи і коливань зовнішнього джерела, амплітуда коливань даної механічної системи різко збільшується. Ця властивість використовується у вимірювальних приладах вібраційної системи.

Вібраційний частотомір (рис. 69) складається з електромагніту 1, сталевого якоря 2, закріпленого на бруску 5, та кількох вібраторів 3 з різною довжиною

або масою. Кінці вібраторів відігнуті під прямим кутом і розміщені горизонтально в щілині на шкалі частотоміра. Брусок 5 прикріплений до пластинчастих пружин 5 і це забезпечує певну рухомість механічної системи.

Якщо по обмотці електромагніту пропустити змінний струм, то якір 2 дужче притягуватиметься до полюсів у ті моменти, коли сила струму буде найбільшою, тобто два рази за період. Коливання якоря передаються вібраторам. З найбільшою амплітудою коливатиметься вібратор, власна частота коливань якого збігається з частотою коливань якоря. Цифра, яка знаходиться на шкалі напроти вібратора, що коливається з найбільшою амплітудою, покаже частоту струму в мережі.

Більшість частотомірів вібраційної системи призначені для вимірювання частот 45...55 Гц. Проте є й частотоміри, розраховані на вимірювання більш високих частот (1550... 1650 Гц).

Перевагою приладів вібраційної системи є незалежність показів від напруги в мережі. Недоліки цих приладів полягають у залежності показів від механічних вібрацій, неможливість вимірювання високих частот і переривність шкали, внаслідок чого утруднюються вимірювання на проміжних частотах, коли одночасно коливаються кілька вібраторів.

7. ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

Для вимірювання сили струму та напруги використовуються вимірювальні прилади різних систем — амперметри та вольтметри, умовні позначення і схеми приєднання яких наведені на рис. 4.

Малі сили струму вимірюють гальванометрами, мілі- та мікроамперметрами, а низькі напруги — мілі- та мікровольтметрами.

Приєднання амперметра послідовно з навантаженням не повинно впливати на вимірювану силу струму в колі, тому опір амперметра має бути малим порівняно з опором приймача енергії. За малого опору амперметра R_a мала і споживана ним потужність $P_a = I_a^2 + R_a$.

Ввімкнення вольтметра не повинно впливати на вимірювану напругу, тому опір вольтметра має бути більшим від опору приймача, паралельно якому він приєднаний. За великого опору вольтметра R_v сила струму I_v в ньому мала і споживана ним потужність $P_v = I_v^2 + R_v$ теж невелика.

Для вимірювання сил струмів і напруг, які перевищують верхню межу вимірювання приладу, застосовують при постійному струмі шунти й додаткові опори, а при змінному — вимірювальні трансформатори сили струму й напруги (див. § 62).

Якщо амперметром потрібно виміряти силу струму, яка перевищує межі шкали, то паралельно амперметрові приєднують шунт $R_{ш}$. Насправді шунт приєднують послідовно з навантаженням, а амперметр — паралельно шунтові. Шунт являє собою товсту константову або манганинову пластину. Використання для цього мангану і константану пояснюється тим, що опір цих металів незначною мірою залежить від температури. Якщо опір шунта в 9 разів менший від опору обмотки амперметра, то 0,9 сили струму пройде через

шунт і лише 0,1 —через прилад. При цьому межі вимірювань приладу розширяться в 10 разів.

Опір шунта визначають за формулою $R_{ш} = R_a / (n - 1)$, де R_a — опір обмотки амперметра; n —число, що показує, у скільки разів розширюються межі вимірювань приладу. Після приєднання шунта на шкалі приладу треба проставити множник (у даному випадку $\times 10$). У разі ввімкнення амперметра з шунтом фактична сила струму в колі визначається добутком показів приладу на множник n .

Шунт повинен мати чотири контакти: до двох приєднують прилад, а до інших двох — з'єднувальні проводи електричного кола. Таке приєднання виключає залежність показів приладу від перехідних опорів контактів.

У тих випадках, коли вольтметром потрібно виміряти напругу, яка перевищує межі шкали, то послідовно з вольтметром приєднують додатковий резистор опором R_A . Якщо в додатковому резисторі опір R_0 буде в 9 разів більший від опору обмотки вольтметра, то 0,9 загальної напруги припадатиме на додатковий резистор R_n і лише 0,1 — на опір обмотки вольтметра R_v . При цьому межі вимірювання приладу розширяться в 10 разів. Опір додаткового резистора розраховують за формулою $R_a = R_v (n - 1)$, де n — число, яке показує, у скільки разів розширюються межі вимірювань приладу.

Очевидно, що після приєднання додаткового резистора потрібно виготовити нову шкалу або на тій шкалі, яку має прилад, поставити відповідний множник. Оскільки опір додаткових резисторів у щитових приладах може досягати кількох тисяч омів, їх виконують у вигляді котушок з тонкого дроту з великим питомим опором.

Шунти та додаткові резистори можна монтувати всередині приладу або приєднувати до його затискачів на час вимірювань. В останньому випадку на шкалі приладу зазначають: «З окремим шунтом» або «З окремим додатковим резистором».

8. ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ

Для вимірювання опорів можна використати метод амперметра і вольтметра. Частка від ділення показів вольтметра, приєданого до випробуваного резистора, на покази амперметра, приєданого послідовно з цим резистором, визначає його опір $R = U/I$. Для більшої точності в разі вимірювання малих опорів прилади слід приєднати за схемою (рис. 70, а) так, щоб опір амперметра не вносив похибки в покази вольтметра, а в разі вимірювання великих опорів (рис. 70, б) — так, щоб сила струму вольтметра не впливала на покази амперметра. Додатковий резистор R_0 введено для обмеження сили струму.

Для безпосереднього вимірювання опорів використовують о м м е т р и т а м е г а о м м е т р и , які можна вмикати в схему послідовно або паралельно.

Омметр являє собою вимірювальний прилад магнітоелектричної системи з внутрішнім $R_{дж}$ та додатковим R_0 резисторами. Послідовно з омметром приєднують вимірювальний резистор R_x (рис. 70, в). Якщо резистор R_x від'єднати

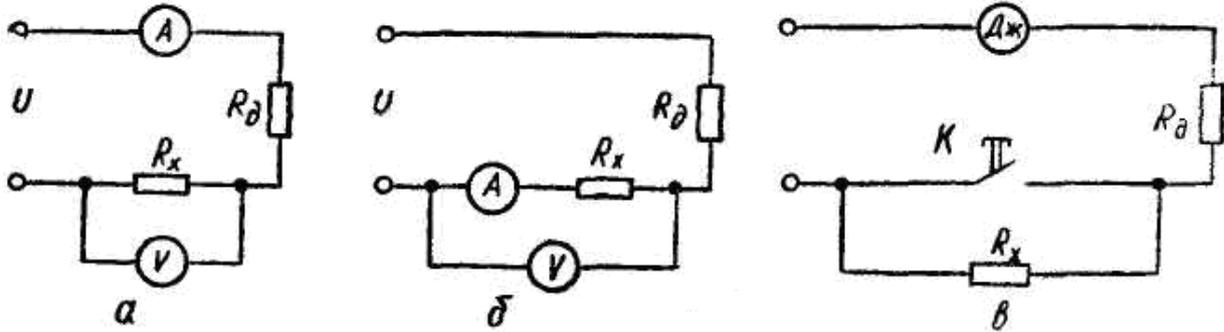


Рис. 70. Схеми приєднання амперметра та вольтметра для вимірювання опорів:

a — малих; $б$ — великих; $в$ — послідовна схема омметра.

і кнопку K розімкнути, то струму в колі не буде і стрілка приладу покаже нескінченно великий опір ($R_x = \infty$).

Якщо кнопку K замкнути, то опір кола ($R_0 + R_{дж}$) буде мінімальним, тобто сила струму буде максимальною [$I_{max} = U/(R_0 + R_{дж})$], і стрілка приладу відхилиться на найбільший кут, показуючи нульовий опір ($R_x = 0$). Якщо приєднати вимірюваний резистор R_x , сила струму в колі зменшиться [$I = U/(R_x + R_0 + R_{дж})$], і стрілка приладу відхилиться на менший кут, показуючи на шкалі приладу значення опору R_x . Омметр має самостійне джерело живлення у вигляді сухих елементів. Недоліком такого омметра є залежність його показів від напруги джерела живлення.

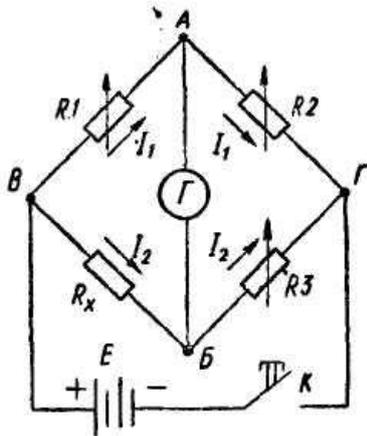


Рис. 71. Схема моста для вимірювання опору.

Одним із методів вимірювання опору та інших електричних параметрів (індуктивності, ємності) є застосування моста постійного та змінного струму. Міст для вимірювання опору (рис. 71) складається з трьох плечей з регульованими резисторами R_1 , R_2 , R_3 (магазинів опорів), які разом з четвертим вимірюваним резистором R_x утворюють замкнений контур $АГБВ$. До точок B і $Г$ приєднується джерело живлення, а до точок A і $Б$ — гальванометр $Г$. Регулюванням резисторів R_1 , R_2 та R_3 добиваються нульового відхилення стрілки гальванометра. У цьому разі потенціали точок A і $Б$ однакові (міст зрівноважено), тобто $U_{BA} = U_{BB}$ і $U_{AG} = U_{BG}$ або $I_1 R_1 = I_2 R_x$ і $I_1 R_2 = I_2 R_3$. Поділивши одну рівність на другу, матимемо $I_1 R_1 / I_1 R_2 = I_2 R_x / I_2 R_3$, звідки $R_x = R_1 R_3 / R_2$. Коли вимірюються малі опори, велику похибку вносять опори контактів і з'єднувальних провідників. У цих випадках використовуються складніші схеми (подвійні мости).

У разі незмінних напруги живлення та опорів R_1 , R_2 і R_3 трьох плечей моста покази гальванометра залежать від опору R_x , що дає змогу на шкалу гальванометра нанести значення вимірюваного опору або значення того

параметра, від якого залежить опір (температури, тиску, вологості тощо). Такі мости називаються незрівноваженими.

Справна робота будь-якої електротехнічної установки великою мірою залежить від стану ізоляції між проводами та між струмоведучими частинами та землею. Ця ізоляція відносно легко зазнає старіння від дії вологи, високої температури і т. д.; тому опір ізоляції потрібно періодично вимірювати.

Опір ізоляції мережі, яка не перебуває під робочою напругою, вимірюють мегаомметром, один затискач якого (позначений літерою L) приєднують до випробуваного провідника, а другий його затискач (позначений літерою Z) з'єднують із землею. Обертаючи ручку індуктора мегаомметра, який являє собою маленький магнітоелектричний генератор, на шкалі приладу відлічують значення вимірюваного опору. Для вимірювання опору ізоляції між двома проводами до них приєднують затискачі L і Z мегаомметра. Згідно з правилами устаткування електроустановок найменший допустимий опір ізоляції освітлювальних та силових електропроводок становить 0,5 МОм.

9. ЛОГОМЕТРИ

Л о г о м е т р а м и (від грецького слова «логос» — відношення) називаються прилади, у яких кут повороту вимірювальних механізмів залежить від відношення сил струмів.

У більшості електровимірювальних приладів безпосереднього відліку відхилення рухомої частини залежить від сили струму, що протікає через прилад. Під час вимірювання певного електричного чи неелектричного параметра X (переміщення, тиск, кут повороту тощо) потрібно, щоб сила струму, що протікає через прилад, залежала від параметра, який має бути виміряний. Проте сила струму прямо пропорційна напрузі і покази приладу для вимірювання певного параметра X стають залежними від двох змінних — вимірюваного параметра та напруги U джерела струму. У разі відсутності прямиї залежності між X та U залежність показів приладу від напруги виключав можливість градування шкали в одиницях X (наприклад, в омах), оскільки зміна напруги призведе до похибок у вимірюваннях. Щоб уникнути впливу змін напруги на покази приладу, в логометрах положення рівноваги рухомої частини обумовлюється відношенням сил струмів.

Електровимірювальний прилад будь-якої системи є логометром, якщо в ньому не тільки обертаючий, але й протидіючий моменти утворюються електричним шляхом, тобто для логометрів характерна відсутність механічного протидіючого моменту (пружин). Спрощену схему магнітоелектричного логометра для вимірювання опору наведено на рис 72. Рухома частина приладу складається з двох рамок, установлених на спільній осі і жорстко скріплених між собою під певним кутом. Струм котушок, намотаних на рухомі рамки, підводиться через три м'які срібні спіралі, які не утворюють механічного моменту. Якщо рухома частина добре зрівноважена, то за відсутності струмів вона перебуватиме у стані індиферентної рівноваги. Рухомі котушки приєднуються до спільного джерела струму, а їхні кола замикаються через резистори; R — змонтований всередині приладу; R_x , опір якого вимірюється, —

зовні приладу. Струми, що протікають по котушках приладу, взаємодіючи з магнітним полем полюсів, утворюють два моменти: $M_{об}$ — обертаючий та $M_{пр}$ — протидіючий. Ці моменти протилежні за напрямком, причому повертання рухомої частини в напрямку одного з моментів обумовлює зменшення цього моменту, бо котушка, що утворює цей момент, входить у розрідженішу частину магнітного поля; одночасно з цим збільшується момент протилежного напрямку.

Отже, автоматично встановлюється рівновага моментів ($M_{об} = M_{пр}$), і будь-якому відношенню сил струмів у котушці приладу відповідає деяке положення рівноваги за певного відхилення стрілки приладу. Кут відхилення стрілки приладу залежить від відношення сил струмів у котушках I_1/I_2 .

Оскільки сили струмів у паралельних відгалуженнях обернено пропорційні опорам, тобто $I_1/I_2 = R/R_x$, а опір R відомий, то кут повороту стрілки приладу залежить тільки від вимірюваного опору R_x і на нього не впливає напруга джерела. Тому шкала приладу може бути градуйована в одиницях опору (в омах) і тоді логометр стане омметром. Якщо вимірюваний опір R_x виготовлений із провідного матеріалу з великим температурним коефіцієнтом, то цей же прилад можна використати як електричний термометр. Якщо за R_x взяти стовпчик з вугільних пластин, опір якого значною мірою залежить від сили їх стиснення, то прилад можна використати для вимірювання тиску та інших параметрів.

10. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ

Для вимірювання потужності в колі постійного струму спеціальний прилад не потрібен, оскільки потужність $P = UI$ можна легко підрахувати за показами вольтметра й амперметра.

У колі змінного струму потужність залежить не тільки від напруги й сили струму, але й від зсуву фаз між ними: $P = UI \cos\phi$. Тому для вимірювання потужності в цьому випадку потрібен спеціальний прилад — ватметр електродинамічної або феродинамічної системи. В електродинамічному ватметрі нерухома котушка з'єднується послідовно з навантаженням R_n , а

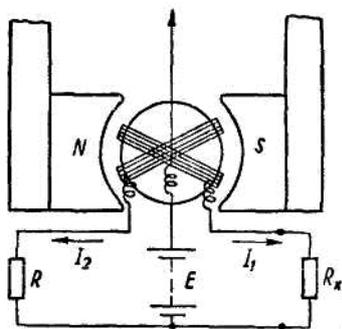


Рис. 72. Схема магнітоелектричного логометра.

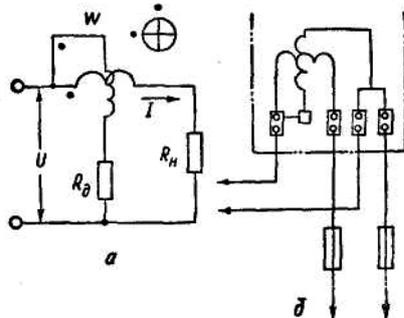


Рис. 73. Схема приєднання: а — ватметра; б — лічильника.

рухома забезпечується додатковим резистором R_n і приєднується паралельно навантаженню (рис. 73, а). Отже, миттєве значення сили струму нерухомої котушки дорівнює силі струму навантаження, а сила струму рухомої котушки

прямо пропорційна напрузі на затискачах приймача і повинна збігатися з напругою за фазою. Щоб сила струму збігалася за фазою з напругою,

додатковий активний опір R_d має бути набагато більшим від індуктивного опору самої обмотки, що дає змогу вважати опір кола напруги активним.

Обертаючий момент у електродинамічного ватметра прямо пропорційний добуткові напруги на силу струму. У разі введення ватметра в коло змінного струму на обертаючий момент не впливає одночасна зміна напрямку сили струму в обох котушках, але якщо поміняти місцями затискачі однієї з котушок ватметра, то це змінить фазу сили струму в цій котушці на 180° і напрямок обертаючого моменту. Щоб запобігти можливості неправильного приєднання ватметра, відносні «початки» двох його котушок (генераторні затискачі), приєднані до одного й того ж полюса джерела, позначаються біля затискачів приладу знаком \times ; кінці цих котушок приєднані до різних полюсів навантаження. Електродинамічні ватметри використовуються в колах змінного й постійного струму.

Для феродинамічних ватметрів характерна менша точність вимірювання і для кіл постійного струму вони непридатні через вплив гістерезису.

Витрати електричної енергії змінного струму вимірюють лічильниками індукційної системи. Схема ввімкнення лічильника в мережу (рис. 73, б) аналогічна схемі приєднання ватметра, тобто одна обмотка лічильника з'єднується послідовно з навантаженням, а друга — паралельно йому. На відміну від ватметрів у колі паралельної обмотки жодних додаткових резисторів немає, бо для створення обертового магнітного поля сили струмів у двох котушках мають бути зсунуті за фазою на кут, що наближається до 90° . На таблиці лічильника зазначено напругу, силу струму, частоту, на якій він розрахований, у яких одиницях вимірюється енергія, якій кількості обертів диска відповідає витрата енергії 1 кВт ч.

11. ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Широко застосовується вимірювання неелектричних параметрів електричними методами, які дають змогу виконувати дистанційні, безперервні, високої точності й чутливості вимірювання. Для вимірювання неелектричний параметр перетворюють у залежний від нього електричний, який визначається за показами електровимірювального приладу. Елемент, який перетворює неелектричний вимірюваний параметр у залежний від нього електричний, називається **п е р в и н н и м п е р е т в о р ю в а ч е м**. Перетворювачі поділяються на дві групи: **п а р а м е т р и ч н і**, що перетворюють неелектричну величину в один із параметрів електричного кола R , L або C , та **г е н е р а т о р н і**, в яких неелектрична величина перетворюється в ЕРС.

Вище зазначалось (див. § 52), що під час вимірювання опору, який залежить від температури (терморезистор), логометр стає термометром і його шкалу можна проградувати в градусах. Якщо за чутливий елемент використовують тензорезистор, то прилад вимірює силу стиснення або тиск. Якщо ж чутливим елементом є реостат (реостатний перетворювач), повзун якого переміщується під дією вимірюваної неелектричної величини, змінюючи опір реостата, то в

цьому випадку логометр можна використати для визначення рівня рідини, лінійного або кутового переміщення деталі тощо.

Індуктивні та ємнісні параметричні перетворювачі служать для вимірювання сили, тиску, лінійного або кутового переміщення деталі. У цих перетворювачах індуктивність або ємність змінюється залежно від положення однієї з частин перетворювача під дією вимірюваної величини.

У генераторних перетворювачах індукційного типу вимірювана неелектрична величина (наприклад, швидкість, лінійні або кутові переміщення) перетворюється в ЕРС. Зокрема, індукційний тахометр, який служить для вимірювання частоти обертання, перетворює вимірювану величину в пропорційну їй ЕРС.

Тахометр являє собою генератор малої потужності, якір якого обертається в магнітному полі постійного магніту і ЕРС якого прямо пропорційна частоті обертання якоря. Якір механічно зв'язаний з валом машини, частота обертання якої вимірюється, тому покази вольметра V , з'єднаного з затискачами якоря, прямо пропорційні вимірюваній величині.

Крім індукційних, до перетворювачів генераторного типу належать термоелектричні, п'єзоелектричні та ін. У п'єзоелектричних перетворювачах використовується виникнення ЕРС у деяких кристалах під дією механічних сил (п'єзоелектричний ефект) для вимірювання цих сил або тиску.

Пристрої для вимірювання неелектричних параметрів у своєму складі повинні мати перетворювач, з'єднувальні проводи та електровимірювальний прилад, шкала якого проградуєвана в одиницях вимірюваної величини. Насправді ці пристрої значно складніші, бо в них є ще джерела живлення, стабілізатори, випрямлячі, підсилювачі і т. д.

12. ЦИФРОВІ ПРИЛАДИ

У сучасній вимірювальній техніці використовуються прилади з цифровою шкалою, або цифрові прилади. У цифрових приладах вимірюваний параметр, що безперервно змінюється, перетворюється в дискретний (переривистий) параметр у вигляді цифри, яка зображується на його відліковому пристрої. У цих приладах вимірюваний параметр порівнюється з заданим, тобто для вимірювання застосовується нульовий метод. Вимірюваний параметр спеціальною електронною схемою автоматично перетворюється в цифри, які висвітлюються на панелі цифрової індикації. Наприклад, у цифровій лампі розміщується десять катодів, які відповідають цифрам десяткового ряду 0...9 і висвітлюють будь-яку цифру цього ряду, коли на них подається відповідний сигнал.

Цифровими приладами поступово замінюють стрілкові, оскільки для перших характерні вищі експлуатаційні показники. Наприклад, п'ятизначний цифровий прилад В7-18 можна використати для вимірювання сили струму, напруги, опору та частоти струму. Тривалість одного вимірювання не перевищує кількох мілісекунд із похибкою 0,01...0,1 %.

Цифрові прилади в поєднанні з обчислювальними машинами використовуються для автоматичного контролю керування виробничими процесами.

Недоліками цифрових приладів є їхня складна будова й порівняно висока вартість.