

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Кафедра електричної інженерії

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до практичних занять з дисципліни
«ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ»

для студентів спеціальностей

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

144 Теплоенергетика

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

171 Електроніка

172 Телекомунікації та радіотехніка

усіх форм навчання

Покровськ, 2021

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

**Факультет МЕХТ
Кафедра електричної інженерії**

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

**до практичних занять з дисципліни
ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ**

для студентів спеціальностей

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

144 Теплоенергетика

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

171 Електроніка

172 Телекомунікації та радіотехніка

усіх форм навчання

Покровськ, 2021

УДК 621.38(072)
М 54

Методичні рекомендації до практичних занять з дисципліни «Електричні вимірювання», для студентів спеціальностей 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 144 Теплоенергетика, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, 171 Електроніка, 172 Телекомунікації та радіотехніка усіх форм навчання [Електронний ресурс] / уклад. Е.М. Нємцев. – Покровськ: ДВНЗ ДонНТУ, 2021. – 78 с.

У методичних рекомендаціях викладено загальні положення та тематичний зміст практичних робіт з вибіркової навчальної дисципліни «Електричні вимірювання». Методичні рекомендації містять вимоги щодо виконання практичних робіт з навчальної дисципліни, інформацію та методичні вказівки для вивчення класифікації, умовних позначень, схем та особливостей конструкції приладів та пристроїв для здійснення електричних вимірювань.

Укладач:

Е.М. Нємцев, старший викладач кафедри електричної інженерії ДВНЗ ДонНТУ

Рецензент: В.В. Поцєпаєв, к.т.н., доц. доцент кафедри автоматики та телекомунікацій ДВНЗ ДонНТУ

Відповідальний за випуск: Колларов О.Ю., к.т.н., доц. зав. кафедри електричної інженерії ДВНЗ ДонНТУ

Затверджено навчально–методичним відділом ДонНТУ,

протокол № 3 від 26.10.2021 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електричної інженерії

протокол № 3 від 30.09.2021 р.

ДВНЗ ДонНТУ, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
Практична робота №1	
Основні поняття метрології. Одиниці вимірювань електричних величин.....	7
Практична робота №2	
Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки.....	13
Практична робота №3	
Визначення похибок прямих і непрямих вимірювань.....	25
Практична робота №4	
Огляд конструктивних особливостей та принципу дії основних типів стрілочних приладів.....	33
Практична робота №5	
Огляд функціональних схем цифрових вимірювальних приладів.....	43
Практична робота №6	
Огляд схем вимірювання струмів і напруг у електричних ланцюгах.....	50
Практична робота №7	
Огляд схем вимірювання потужності у ланцюгах змінного струму.....	61
Практична робота №8	
Огляд технологій вимірювання неелектричних величин.....	69
Список рекомендованої літератури.....	79

ВСТУП

Вимірювання електричних величин є важливою частиною ефективного функціонування будь-якого підприємства чи виробництва. Вимірювання є результатом безпосереднього використання електровимірювальних приладів для контролю показань, які визначають значення вимірюваних електричних величин або для використання вимірюваних електричних величин у якості керуючих сигналів електричної (електронної) системи чи для подальшого перетворення у будь-яку іншу фізичну величину.

У загальному випадку, вимірювання – це відношення між двома величинами, які порівнюються між собою, а основною задачею є пошук зразків електричних величин для здійснення вимірювань. На практиці для вимірювань використовують калібровані прилади, які порівнюють досліджувану електричну величину не з електричним зразком, а з іншою величиною (наприклад, зусиллям від пружного елемента (пружини) у аналогових приладах).

При здійсненні вимірювань дуже важливим є застосування загальноприйнятих одиниць вимірювання, які повинні бути незмінними і відтворюваними. Для цього необхідно використовувати одиниці вимірювання Міжнародної системи одиниць.

Точність здійснення вимірювань залежать від показників точності вимірювального обладнання та надійності електричних з'єднань. Дотримання нормованої якості з'єднань, використання герметизованих датчиків, застосування електричних і магнітних екранів, використання фільтруючих елементів, запобіжників та заземлень дозволяє знизити вплив зовнішніх збурюючих впливів та підвищити якість і точність вимірювань.

Основними характерними електричними величинами при вимірюванні є: електричний струм, електрична напруга, електричний заряд, електричний опір, ємність, індуктивність і електрична потужність. За допомогою електричних приладів можливо також вимірювання широкого кола неелектричних величин.

Вимірювання та моніторинг електричних і неелектричних величин дозволяють заздалегідь визначити відхилення нормованих показників роботи обладнання та порушення технологічних процесів, запобігти розвитку несправностей, планувати технічне обслуговування завдяки ранньому виявленню проблем, здійснювати оптимізацію виробництв.

Практична робота №1

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ МЕТРОЛОГІЇ. ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Мета роботи: Вивчити основні поняття, що використовуються при електричних вимірюваннях, і одиниці вимірювань, які при цьому використовуються.

Загальні поняття метрології при електричних вимірюваннях

Метрологія – це наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності за умови досягнення необхідної точності.

Вимірювання – це процес знаходження значень фізичних величин дослідним шляхом з використанням спеціальних технічних засобів (наприклад, електровимірювальні прилади).

Величина – це властивість фізичного об'єкта (наприклад, довжина, маса, напруга).

Значення величини – це її кількісна характеристика в одиницях виміру (наприклад, 3 метри, 10 кілограмів, 15 вольт).

Принцип вимірювання – фізичне явище або ефект, покладений в основу здійснення виміру, який базується на відомих законах фізики і хімії.

Одиниця вимірювання фізичної величини – значення, прийняте за одиницю (наприклад, ампер, вольт, ом).

Еталон – засіб вимірювання (або комплекс засобів вимірювань), що забезпечує відтворення та(або) зберігання одиниці фізичної величини з найвищою точністю для даного рівня розвитку вимірювальної техніки з метою передачі її величини нижчим за повірочною схемою засобам вимірювань і затверджене як еталонну у встановленому порядку.

Еталонні одиниці відтворюються і зберігаються за допомогою Державних первинних еталонів.

Засоби вимірювання – технічні засоби, що мають нормовані метрологічні властивості.

Розрізняють наступні **види засобів** електричних вимірювань:

- електровимірювальні прилади,
- вимірювальні перетворювачі,
- електровимірювальні установки,
- вимірювальні інформаційні системи.

Електровимірювальні прилади – це засоби електричних вимірювань, призначені для виробки сигналів вимірювальної інформації – значення вимірюваної величини у формі, що є доступною для безпосереднього сприйняття спостерігачем (наприклад, амперметр, вольтметр).

Вимірювальні перетворювачі – засоби електричних вимірювань, призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки та зберігання, але не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем. До вимірювальних перетворювачів відносять:

- перетворювачі електричних величин в електричні (наприклад, шунти, дільники напруги),
- перетворювачі неелектричних величин в електричні (наприклад, терморезистори, тензорезистори, індуктивні перетворювачі).

Електровимірювальні установки складаються з ряду засобів вимірювань та допоміжних пристроїв, розташованих в одному місці, за допомогою яких можна здійснювати більш складні і більш точні вимірювання, ніж у разі використання окремих вимірювальних приладів (наприклад, для повірки та градування приладів).

Вимірювальні інформаційні системи являють собою сукупність засобів вимірювальної техніки та допоміжних пристроїв, з'єднаних між собою каналами зв'язку і призначені для автоматичного отримання вимірювальної інформації від різноманітних джерел та для її передачі й обробки (наприклад, контроль стану гідротехнічних споруд та роботи потужних агрегатів електротехнічних систем і апаратів).

Вимірювання у залежності від способу отримання результатів вимірювання ділять на прямі та непрямі.

Прямими називають вимірювання, які отримують шляхом безпосередніх вимірювань (наприклад, вимірювання напруги вольтметром).

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

Непрямими називають вимірювання, при яких кінцеву вимірювану величину визначають не безпосередньо, а знаходять на підставі відомої залежності (наприклад, потужність у ланцюгах постійного струму обчислюють за відповідною формулою: $P = U \cdot I$, де U – напруга (В), яку вимірюють вольтметром, I – струм (А), який вимірюють амперметром).

Залежно від способів, принципів і засобів вимірювань, останні можна поділити на методи безпосередньої оцінки та методи порівняння.

При безпосередній оцінці вимірювана величина визначається безпосередньо за відліковим пристроєм вимірювального приладу прямої дії (наприклад, вимірювання струму амперметром). Даний метод оцінки відрізняється своєю простотою та низькою точністю вимірювань.

При порівняльному методі вимірювана величина порівнюється з величиною, що відтворюється заданою мірою (наприклад, вимірювання електричного опору шляхом порівняння його зі зразковим опором). Даний метод забезпечує більшу точність вимірювання, ніж попередній метод, але водночас маємо ускладнення самого процесу вимірювання.

Огляд одиниць вимірювання електричних величин

При вимірюваннях повинні бути використані загальні (спільні) одиниці. В Україні до використання прийнято **Міжнародну систему одиниць** – **СИ** (аббревіатура усіма мовами SI з фр. *Système International d'Unités*).

У табл. 1.1 наведено ряд основних та похідних одиниць, що є найбільш уживаними при вимірюваннях електричних величин.

Таблиця 1.1 – Основні та похідні одиниці «Міжнародної системи одиниць»

Величина	Назва одиниці	Позначення	
		міжнародне	українське
Основні одиниці			
Довжина	метр	m	м
Маса	кілограм	kg	кг
Час	секунда	s	с
Сила електричного струму	ампер	A	А
Термодинамічна температура	кельвін	K	К
Похідні одиниці			
Частота	герц	Hz	Гц
Сила	ньютон	N	Н
Тиск	паскаль	Pa	Па (Н/м ²)
Робота, енергія, кількість теплоти	джоуль	J	Дж
Електрична потужність	ватт	W	Вт
Кількість електрики	кулон	C	Кл
Електрична напруга, електрорушійна сила	вольт	V	В
Напруженість електричного поля	вольт на метр	V/m	В/м
Електричний опір	ом	W	Ом
Електрична провідність	сименс	S	См
Електрична ємність	фарада	F	Ф
Магнітний потік	вебер	Wb	Вб
Індуктивність	генрі	H	Гн
Магнітна індукція	тесла	T	Т
Електрична провідність	сіменс	S	См
Напруженість магнітного поля	ампер на метр	A/m	А/м
Величина магнітного потоку, потокозчеплення	вебер	Wb	Вб
Коефіцієнт потужності	—	—	cos φ

Найменування кратних і часткових одиниць утворюються шляхом застосування приставок, які наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Найменування кратних і часткових одиниць (приставки, що застосовуються до основних одиниць)

Приставка	Множник	Позначення	
		міжнародне	українське
іотта	10^{24}	Y	І
зетта	10^{21}	Z	З
екса	10^{18}	E	Е
пета	10^{15}	P	П
тера	10^{12}	T	Т
гіга	10^9	G	Г
мега	10^6	M	М
кіло	10^3	k	к
гекто	10^2	h	г
дека	10^1	da	да
деци	10^{-1}	d	д
санті	10^{-2}	c	с
мілі	10^{-3}	m	м
мікро	10^{-6}	μ	мк
нано	10^{-9}	n	н
піко	10^{-12}	p	п
фемто	10^{-15}	f	ф
атто	10^{-18}	a	а
зепто	10^{-21}	z	з
іокто	10^{-24}	y	і

Для організації процесу вимірювань оператор повинен мати визначений запас знань та навичок, що вимагає вибір певного методу та безпосередньої організації вимірювання.

Вибір методу вимірювання визначається прийнятою моделлю об'єкта вимірювання і доступними (наявними) засобами вимірювань. Метод вимірювання, у загальному випадку, визначається застосуванням прийомів порівняння вимірюваної величини з мірою у відповідності з обраним принципом вимірювання.

Вибір методу вимірювання повинен враховувати мінімізацію систематичних похибок вимірювань, обумовлених недосконалістю або обраних моделей, або обраних методів вимірювань. Паралельно необхідно враховувати витрати на проведення зазначених вимірювань та вимоги до точності цих вимірювань.

Важливими факторами, що впливають на результат вимірювання, є умови при яких вони здійснюються: стан навколишнього середовища і

засобів вимірювань. Розрізняють нормальні, робочі та граничні умови проведення вимірювань.

Нормальними умовами вимірювань є умови, що характеризуються сукупністю значень або областей значень величин, що впливають, і які повинні мати нормальне значення або перебувати в області нормальних значень. У межах цієї області зміною результату вимірювання можна знехтувати відповідно до встановлених норм точності. Також, при цих умовах визначається основна похибка засобу вимірювань.

У табл. 1.3 наведено номінальні значення основних величин, що впливають.

Таблиця 1.3 – Номінальні значення величин, що впливають на результати вимірів при електричних вимірюваннях

Найменування величини, що впливає	Одиниця вимірювання	Значення величини
Температура для всіх видів вимірювань	°C	20
	К	293
Тиск навколишнього середовища	кПа	100
	мм рт. ст.	750
Відносна вологість повітря	%	65
Щільність повітря	кг/м ³	1,2
Прискорення вільного падіння	м/с ²	9,8
Магнітна індукція	Тл	0
Напруженість електричного поля	В/м	0
Частота живильної мережі змінного струму	Гц	50±1%
Середньоквадратичне значення напруги мережі живлення змінного струму	В	220±10%

Висновки: однією з основних задач метрології є обслуговування точних наук та технологічних процесів і виробництв, які не допускають нечітких та навіолонаукових тлумачень, виокремлених визначень і понять. Тому усі визначення при вимірюваннях повинні бути однозначними та відповідними державним стандартам. Єдність вимірювань полягає у забезпеченні такого стану вимірювань, при яких усі поняття і визначення є однозначними, а результати вимірювань виражаються у стандартизованих одиницях та мають похибки із заздалегідь визначеною чи заданою ймовірністю.

Зміст звіту

У звіті навести:

- основні визначення метрології,
- занотувати і вміти розрізняти засоби при здійсненні електричних вимірювань,
- занотувати та вивчити основні та похідні одиниці «Міжнародної системи одиниць»,
- занотувати та вивчити найменування кратних і часткових одиниць (особливу увагу приділити серединній частині табл. 1.2),
- занотувати номінальні значення величин, що впливають на процес, при проведенні електричних вимірювань,
- письмово відповісти на контрольні питання та виконати поставлені завдання.

Контрольні питання та завдання

1. У чому полягає сутність понять «основна» та «похідна» фізична величина?
2. Що характеризують терміни: «вимірювання», «одиниця вимірювання фізичної величини», «електровимірювальний прилад», «вимірювальна інформаційна система»? Навести приклади.
3. Визначити чинники, що впливають на вибір методу вимірювання.
4. Схарактеризувати поняття «еталон».
5. Визначити основні одиниці «Міжнародної системи одиниць».
6. Що криється за поняттям «нормальні умови вимірювань»?
7. Визначити переваги і недоліки методу безпосередньої оцінки та методу порівняння.

Література: [1, 2, 3, 4, 5].

Практична робота №2

МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Мета роботи: Вивчити метрологічні характеристики засобів вимірювання та умовні позначення на відлікових пристроях цих приладів.

Загальні характеристики засобів вимірювання

Засіб вимірювання – це технічний засіб, призначений для здійснення вимірювань, має нормовані метрологічні характеристики і відтворює та(або) зберігає одиницю фізичної величини, значення якої приймається незмінним (у межах встановленої величини похибки) впродовж визначеного інтервалу часу.

Засоби вимірювань мають визначені номінальні метрологічні характеристики, які відрізняються від реальних характеристик, що визначається значеннями інструментальної похибки.

Метрологічна характеристика засобів вимірювань – характеристичні властивості засобів вимірювання, які впливають на кінцеві результати та похибки вимірювань.

Метрологічні характеристики з одного боку регламентуються у нормативній документації (їх називають нормованими), а з іншого – визначаються експериментально (їх називають дійсними). Окремий екземпляр засобів вимірювань повинен мати метрологічні характеристики, що не виходять за межі, обумовлені у нормативних документах.

Основна маса засобів вимірювальної техніки стандартизована – вони випускаються серійно і в обов'язковому порядку піддаються періодичним випробуванням. Нестандартизовані засоби вимірювання випускаються одиничними екземплярами, не проходять обов'язкових випробувань, а їх метрологічні характеристики визначаються при метрологічній атестації.

По відношенню до вимірюваної фізичної величини засоби вимірювання ділять на:

- основні – засоби вимірювання фізичної величини, значення якої необхідно отримати відповідно до завдання,
- допоміжні – засоби вимірювань фізичної величини, вплив якої на основні засоби вимірювань необхідно врахувати для отримання результатів вимірювань із заданою точністю.

За виконуваною роллю засобів вимірювань у процесі вимірювання і виконуваних функцій ці засоби вимірювання розділяються на міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні прилади, вимірювальні системи та вимірювальні установки. Вимірювальні прилади, вимірювальні установки та вимірювальні системи є комплексними засобами вимірювань та призначені для здійснення всієї процедури вимірювань.

Вимірювальний прилад – це засіб вимірювання, призначений для отримання значень вимірюваної фізичної величини у встановленому діапазоні.

За принципом дії вимірювальні прилади можна розділити на:

- електромеханічні, які використовують у ланцюгах постійного струму та низьких частотах,
- електронні, які використовують у ланцюгах постійного струму у широкому діапазоні частот.

За способом представлення результатів вимірювальні прилади можна розділити на:

- аналогові (зі стрілочним індикатором та самописні), показання яких є безперервною функцією вимірюваної величини,
- цифрові, показання яких є результатом автоматичного формування дискретних сигналів вимірювальної інформації, що представляється у цифровій формі.

Розрізняють вимірювальні прилади прямої дії та прилади порівняння.

Прилади прямої дії відображають виміряне значення на індикаторі в одиницях цієї величини (до таких приладів відносяться вольтметри та амперметри).

Прилади порівняння (або компаратори) слугують для порівняння вимірюваних величин з величинами, значення яких відомі або задані заздалегідь.

За призначенням прилади поділяють на робочі і зразкові (цей поділ визначає вартість приладу і величину похибки вимірювання – прилад з похибкою вимірювань у 10 разів менша у порівнянні з заданим коштує у середньому в 10 разів більше).

Робочі прилади призначені тільки для вимірювання у всіх областях техніки та господарювання.

Зразкові прилади слугують для перевірки та градування робочих приладів.

Аналогові вимірювальні прилади є найпоширенішими у вимірювальній практиці. Шкали аналогових вимірювальних приладів можуть бути рівномірними (лінійними) та нерівномірними:

– **рівномірна шкала** (рис. 2.1 а) – це шкала з постійною довжиною між поділками (постійною ціною поділки) – таку шкалу мають лише електромеханічні прилади магнітоелектричної,

– **нерівномірна шкала** (рис. 2.2 б) – це шкала з непостійною довжиною між сусідніми поділками (непостійною ціною поділки) – таку шкалу мають електромеханічні прилади електромагнітної, електродинамічної, феродинамічної, електростатичної, термоелектричної та випрямної систем.

За напрямком градування розрізняють прямі та зворотні шкали:

– **пряма шкала**, яка є найпоширенішою, градуйована зліва направо, тобто нуль на шкалі розташований зліва (рис. 2.1 а, б),

– **зворотна шкала** градуйована справа наліво, тобто нуль на шкалі розташований праворуч (рис. 2.1 в).

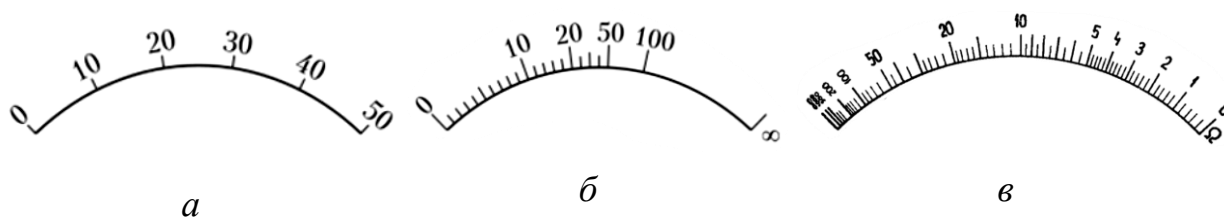


Рисунок 2.1 – Приклади рівномірної (а), нерівномірної (б) та зворотної нерівномірної (в) шкал

У залежності від положення «нуля» на шкалі і напрямку руху покажчика розрізняють односторонні, двосторонні і безнульові шкали:

– одностороння шкала – це шкала, по якій покажчик при вимірюванні відхиляється тільки в одну сторону від нуля (рис. 2.1),

– двостороння шкала – це шкала, по якій стрілка індикатора при вимірюванні відхиляється як вліво, так і вправо від нуля. Відхилення вліво від нуля дає негативні значення вимірюваної величини, а відхилення вправо – позитивні (рис. 2.2 а),

– безнульова шкала – це шкала, на якій відсутня нульова позначка (рис. 2.2 б).

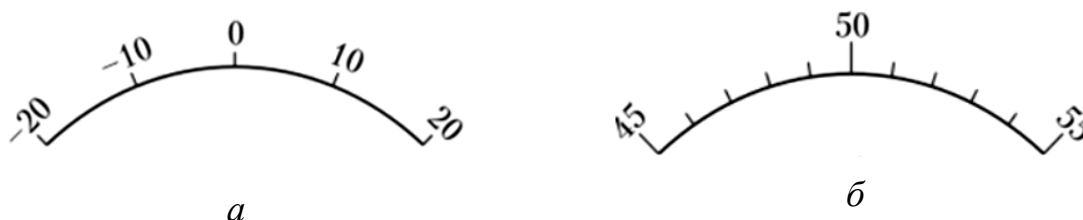


Рисунок 2.2 – Приклади двосторонньої (а) і безнульової (б) шкал

Діапазон вимірювань шкали – діапазон зміни фізичної величини, яка може вимірюватися даним приладом. За межами цього діапазону похибка вимірів не буде відповідати класу точності приладу.

Діапазон вимірювання за шкалою не завжди збігається з межею вимірювання приладу. У цьому випадку цей діапазон указується відсутністю молодших поділок за межами діапазону шкали, точками або потовщенням дуг шкали.

Наприклад, на рис. 2.1а робочим діапазоном є ділянка від 10 А до 50 А; на рис. 2.1б, – ділянка від 80 В до 110 В; на рис. 2.1в – від 0,1 МОм до 0,5 МОм або від 0,06 МОм до 0,4 МОм – у залежності від застосування приладу. На робочій ділянці завод-виробник гарантує заявлений клас точності.

Огляд позначень на електровимірювальних приладах

Вимірювальний прилад складається з вимірювального перетворювача з приєднаними до них пристроїв відображення вимірювальної інформації – відлікового пристрою.

Відлікові пристрої поділяють на шкальні, цифрові та реєструючі.

Шкальні відлікові пристрої складаються зі шкали, яка являє собою сукупність позначок і чисел – ряду послідовних значень вимірюваної величини, та покажчика (механічної стрілки або світлового променя), який має механічний зв'язок з рухливою системою приладу.

Показання засобу вимірювання – це значення величини, що визначається по відліковому пристрою засобу вимірювання та виражене у визначених одиницях цієї величини.

Шкала засобу вимірювання – частина відлікового пристрою засобу вимірювань, що являє собою упорядкований ряд позначок, що відповідають послідовному ряду значень величини, разом з пов'язаною з ним нумерацією (рис. 2.3 а).

Ціна поділу шкали (постійна приладу) «с» дорівнює кількості одиниць вимірюваної величини, що припадає на одну поділку шкали.

Довжина поділок шкали – це відстань між осями або центрами двох сусідніх позначок шкали, виміряні вздовж її базової лінії (рис. 2.3 б).

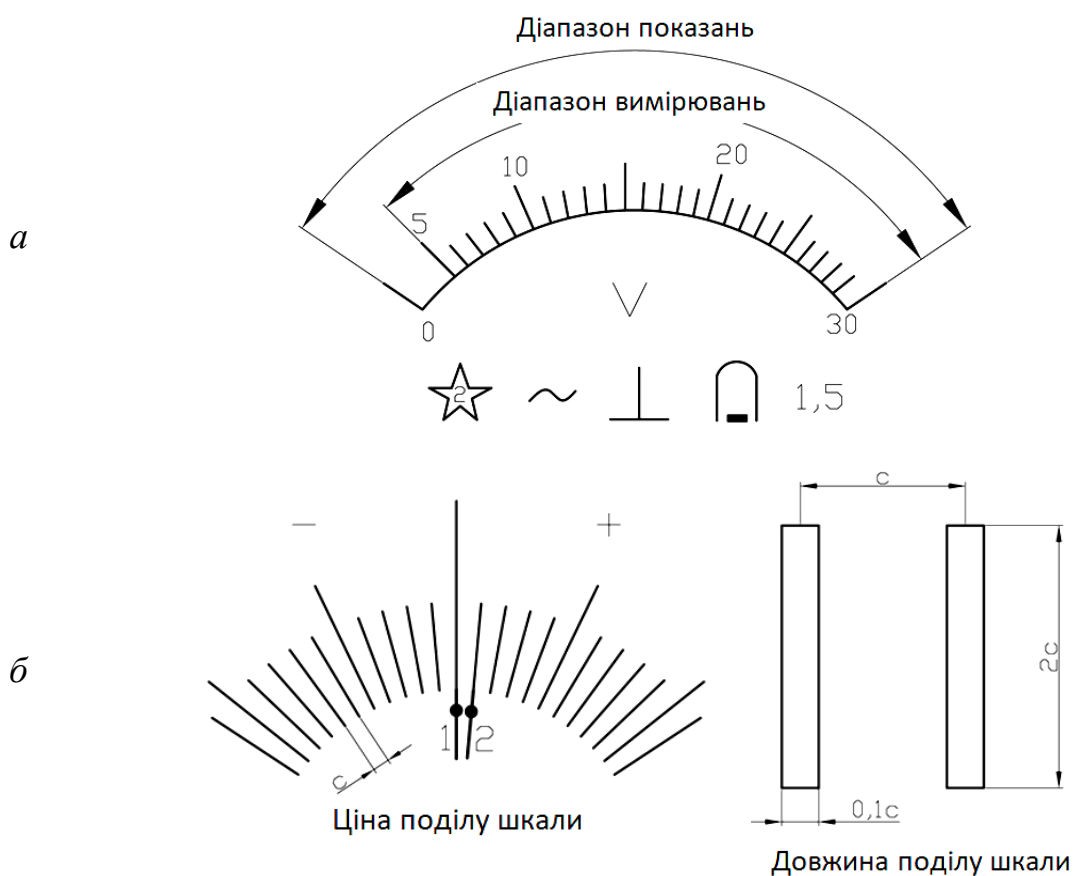


Рисунок 2.3 – Позначення на шкалах аналогових електровимірювальних приладах (а), визначення ціни поділу шкали (б)

Ціну поділки шкали можна визначити за формулою:

$$c = \frac{A_2 - A_1}{n}, \quad (2.1)$$

де A_1, A_2 – сусідні оцифровані поділки,
 n – кількість поділок між двома цифрами.

Наприклад, для рис. 2.3 а: $A_1 = 30$ В, $A_2 = 5$ В, $n = 25$ шт., тому ціна поділу шкали складе:

$$c = \frac{30 - 5}{25} = 1 \text{ В/поділку}.$$

Вимірювальні прилади зі шкальними відліковими пристроями характеризуються чутливістю, діапазоном вимірювань і діапазоном показань.

Електровимірювальні прилади можуть бути схарактеризовані: діапазоном вимірювань, чутливістю, споживаною потужністю, похибками, залежністю показань від змінних та постійних зовнішніх факторів.

Діапазон вимірювань – область значень вимірюваної величини, для якої заздалегідь нормуються допустимі похибки засобу вимірювань, і обмежується верхньою і нижньою межею вимірювань.

Діапазон показань вимірювального приладу – це область значень шкали, обмежена з обох боків початковим і кінцевим значеннями.

Чутливість вимірювального приладу – це відношення зміни сигналу на виході вимірювального приладу до викликаючої цю зміну значення вимірюваної величини і характеризується здатністю приладу реагувати на зміну вимірюваної величини:

$$S = \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha}, \quad (2.2)$$

де $\Delta\beta$ – кутове або лінійне переміщення покажчика вимірювального приладу,

$\Delta\alpha$ – вимірювана величина.

Якщо шкала приладу рівномірна, то чутливість буде мати постійне значення ($S = \text{const}$). У разі нерівномірності шкали приладу, чутливість визначається для кожної точки шкали:

$$S_\alpha = \frac{d\beta}{d\alpha}. \quad (2.3)$$

Ціна поділки – це величина, що є зворотною до чутливості приладу і називається постійною приладу:

$$c = \frac{1}{S} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta}. \quad (2.4)$$

Межа чутливості приладу – це така зміна вимірюваної величини, яке викликає найменшу зміну його показань.

Споживана вимірювальним приладом потужність – це потужність, споживана електровимірювальним приладом при його включенні у вимірювальний ланцюг. При вимірюваннях у малопотужних ланцюгах цей чинник може змінити режим роботи ланцюга, що призводить до похибок вимірювань. Значення даної потужності коливається від 10^{-12} до 15 Вт у залежності від принципу дії, призначення і меж вимірювання приладу.

Для багатограничних електровимірювальних приладів вводять поняття коефіцієнту шкали ($k_{ш}$), який має своє конкретне значення на кожній межі вимірювань.

Коефіцієнтом шкали називають відношення граничних значень двох меж вимірювань: початкового, на який градуйований прилад, і поточного, включеного для конкретного виміру.

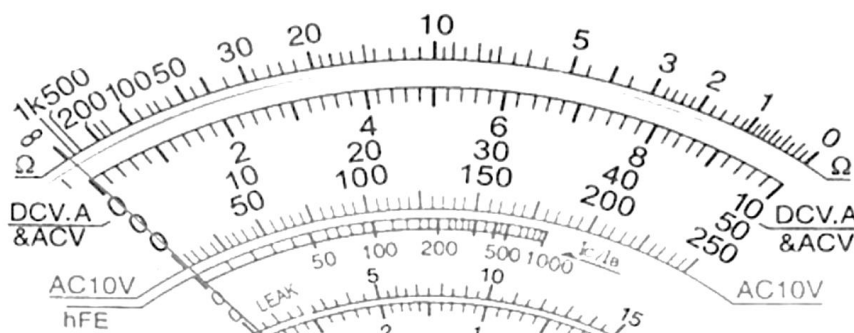


Рисунок 2.4 – До прикладу визначення коефіцієнту шкали

Наприклад, за допомогою приладу, шкала якого зображена на рис. 2.4, серед усього іншого, можна вимірювати значення змінної напруги (ACV) і постійної напруги і струму (DCV.A) має межі їх вимірювання 10-50-250 В (А). У залежності від того, який режим вимірювання буде встановлено на керуючих важелях приладу, маємо три різні коефіцієнти шкали: 1-5-25 відповідно.

Частотний діапазон – це смуга частот, у межах якої похибка приладу, отримана при зміні частоти сигналу, не перевищує допустимих меж. Розрізняють прилади для роботи в ланцюгах постійного струму, змінного струму і універсальні.

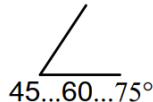
Внутрішній опір приладу (амперметра, вольтметра) зазвичай вказується в паспорті і на лицьовій панелі прямо або опосередковано. Для амперметрів характерний малий опір, а для вольтметрів – великий опір.

Крок шкали – це інтервал оцифрованих поділок, нанесених на шкалі приладу.

Наприклад, якщо на шкалі нанесено і позначено поділки 0-25-50-75, то крок шкали дорівнює 25.

Робоче положення приладів може бути різним, позначення які при цьому використовуються наведено у табл. 2.1. Якщо допускається будь-яке робоче положення приладу, то позначення відсутні.

Таблиця 2.1 – Позначення, що характеризують робоче положення приладів

Найменування положення	Позначення
Вертикальне положення	 або 
Горизонтальне положення	 або 
Похиłe положення по відношенню до горизонтальної площини (наприклад, 60°)	
Похиłe положення по відношенню до горизонтальної площини в робочому діапазоні кутів (наприклад, від 45° до 75°)	

Таблиця 2.2 – Позначення, що характеризують міцність ізоляції по відношенню до корпусу

Найменування позначення	Позначення
Ізоляцію вимірювального ланцюга від корпусу було випробувано під напругою 2 кВ	
Ізоляцію вимірювального ланцюга від корпусу було випробувано під напругою 500 В	
Прилад випробуванню міцності ізоляції не підлягає	
Обережно! Міцність ізоляції вимірювального ланцюга не відповідає нормам!	
Увага! Дивись додаткові вказівки в паспорті приладу	

Рід струму, для роботи на якому призначений прилад, також позначається на шкалі приладу – табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Позначення роду струму, для роботи на якому призначено прилад

Рід струму	Позначення
Постійний струм	—
Змінний однофазний струм	~
Постійний і змінний струм	⎓
Трифазний змінний струм (загальне позначення)	⋈
Трифазний струм при нерівномірному навантаженні фаз	⋈

Позначення класів точності вводиться в залежності від способів завдання меж допустимих похибок. Можливі кілька варіантів позначення класу точності:

- якщо межі допустимої основної похибки виражені в абсолютній формі, то клас точності засобу вимірювання позначають великими літерами латинського алфавіту (наприклад, А, В, С і т.д.) або римськими цифрами (I, II, III і т.д.). Відповідність букв значенням абсолютної похибки наведено у технічній документації на даний засіб вимірювання – чим далі буква від початку алфавіту (або римська цифра від цифри I), тим більше значення абсолютної похибки (наприклад, прилад класу А більш точний, ніж класу С),

- якщо межі допустимої основної похибки виражені у приведеній формі, то клас точності засобів вимірювань позначається арабською цифрою (можливі додаткові умовні знаки), яка вказує межу допустимої похибки. Наприклад, клас точності приладу 1,5 означає, що $\gamma = \pm 1,5\%$,

- якщо межі допустимої основної похибки виражені у відносній формі, то клас точності засобів вимірювань позначається арабською цифрою в колі, що вказує на межу допустимої похибки. Наприклад, клас точності приладу $\textcircled{0,5}$ означає, що $\delta = \pm 0,5\%$.

- якщо межі допустимої основної похибки виражені у комбінованій (адитивно-мультиплікативній) формі, то клас точності засобів вимірювань позначається двома цифрами, відповідними значеннями α і β . Наприклад, клас точності приладу 0,02/0,01 означає, що $\alpha = 0,02$, $\beta = 0,01$.

Клас точності приладу вказується на лицьовій панелі (або/лише у технічній документації) та може слугувати порівняльною характеристикою однотипних приладів (табл. 2.4).

У табл. 2.5 наведено позначення системи вимірювального механізму електровимірювальних приладів.

Таблиця 2.4 – Позначення класів точності на шкалах електровимірювальних приладів

Форма вираження похибки	Позначення класу точності (приклади)	
	у документації	на шкалі приладу
Абсолютна (Δ)	Клас точності М	М
Відносна (δ)	Клас точності 0,5	⓪,5
Відносна у разі завдання комбінованої залежності	Клас точності 0,02/0,01	0,02/0,01
Приведена (γ) – у відсоках від межі вимірювань шкали	Клас точності 1,5	1,5
Приведена для приладів з різко-нерівномірною шкалою – у відсотках від довжини шкали	Клас точності 0,5	0,5 ✓

Таблиця 2.5 – Умовні позначення систем вимірювальних механізмів електровимірювальних приладів у залежності від принципу дії

Принцип дії вимірювального механізму	Позначення
Магнітоелектричний прилад з рухомою рамкою	
Магнітоелектричний логометр з рухомою рамкою	
Магнітоелектричний прилад з рухомим магнітом	
Магнітоелектричний логометр з рухомим магнітом	
Електромагнітний прилад	
Електромагнітний логометр	
Електромагнітний поляризований прилад	
Електродинамічний прилад	
Електродинамічний логометр	
Феродинамічний прилад	

Феродинамічний логометр	
Індукційний прилад	
Індукційний логометр	
Магнітоіндукційний прилад	
Електростатичний прилад	
Вібраційний прилад (язичковий)	
Тепловий прилад (з дротом, що нагрівається)	
Біметалічний прилад	
<i>Додаткові позначення по виду перетворювача</i>	
Термоперетворювач (ізолюваний)	
Термоперетворювач (неізолюваний)	
Випрямляч (напівпровідниковий)	
Випрямляч (електромеханічний)	
Електронний перетворювач	
Перетворювач вібраційно-імпульсний	
Електростатичний екран	
Магнітний екран	

Таблиця 2.6 – Позначення на корпусах електровимірювальних приладів

Найменування позначення	Позначення
Негативний затискач	—
Позитивний затискач	+
Загальний затискач (для багатограничних приладів змінного струму і комбінованих приладів)	*
Затискач постійного струму (у комбінованих приладах) у залежності від полярності	+ або —
Затискач змінного струму (в комбінованих приладах)	~
Затискач, з'єднаний з екраном	Е Екран
Затискач, з'єднаний з корпусом	
Затискач (гвинт, шпилька) для заземлення	
Коректор	
Аретир	Арр. Аретир
Напрямок аретирування	↑

Висновки: Основною частиною приладів є вимірювальний механізм. При впливі вимірюваної електричної величини на вимірювальний механізм його рухома частина повертається на деякий кут, за яким визначається значення вимірюваної величини. У практиці найчастіше застосовуються прилади магнітоелектричної, електромагнітної, електростатичної, електродинамічної систем. Для вибору електровимірювального приладу для проведення вимірювань можливий лише за умови глибоких знань класифікації цих приладів і умовних позначень, які наносяться на їхні шкали та панелі.

Зміст звіту

У звіті навести:

- основні метрологічні характеристики засобів вимірювань,
- навести приклади різних типів шкал аналогових вимірювальних приладів,

- занотувати позначеннями класів точності електровимірювальних приладів,
- занотувати умовні позначення систем вимірювальних механізмів електровимірювальних приладів у залежності від принципу дії, додаткові позначення по виду перетворювача та позначення на корпусах електровимірювальних приладів,
- занотувати номінальні значення величин, що впливають на процес, при проведенні електричних вимірювань,
- письмово відповісти на контрольні питання та виконати поставлені завдання.

Контрольні питання та завдання

1. Визначити поняття «засіб вимірювання».
2. Чим регламентується метрологічна характеристика засобів вимірювань?
3. Яким чином ділять вимірювальні прилади за способом представлення результатів?
4. Визначити відмінності між вимірювальними приладами прямої дії та приладами порівняння.
5. Проаналізувати типи шкал аналогових вимірювальних приладів.
6. Що являють собою відлікові пристрої вимірювальних приладів?
7. За рис. 2.3а розшифрувати позначення на шкалі вимірювального приладу.
8. Визначити відмінності між позначеннями класів точності електровимірювальних приладів.

Література: [6, 7, 8, 9].

Практична робота №3

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК ПРЯМИХ І НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

Мета роботи: Визначити джерела та способи визначення похибок прямих і опосередкованих електричних вимірювань.

Джерела виникнення похибок

Електричні вимірювання здійснюються за допомогою різноманітних за принципом дії та характерними значеннями похибок засобами вимірювання.

Результати вимірювань, отримані у результаті експерименту мають бути здатними до порівняння між собою. Також, необхідною умовою є забезпечення єдності вимірювань, а терміни і визначення, одиниці фізичних величин й правила їх застосування повинні бути уніфіковані і узагальнені для забезпечення вищезазначеної єдності вимірювань.

Істинне значення вимірюваної величини – це значення фізичної величини, що абсолютним чином відображає якісну і кількісну властивість об'єкта. Істинне значення вимірюваної величини є однозначною і постійною величиною, а відшукати його неможливо.

Результат вимірювання – це отримана шляхом вимірювання оцінка вимірюваної фізичної величини у вигляді деякого числового значення прийнятої для неї одиниць вимірювання.

Результати вимірювання фізичної величини дають лише наближене її значення через те, що при вимірюванні будь-якої фізичної величини виникають похибки або помилки вимірювань.

Похибкою вимірювання називається відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини.

Похибки вимірювань можна класифікувати за наступними ознаками:

- за джерелами виникнення розрізняють методичну, інструментальну та суб'єктивну похибки,
- за умовами проведення вимірювань розрізняють похибки, викликані впливом зовнішніх умов на вимірюваний об'єкт і на засіб вимірювання,
- за характером прояву розрізняють: систематичні похибки, випадкові похибки та промахи,
- за способом вираження розрізняють абсолютні та відносні похибки.

Абсолютна похибка вимірювання – дорівнює різниці між результатом вимірювання (A_x) і істинним значенням вимірюваної величини (A).

$$\Delta A = |A_x - A| \quad (3.1)$$

Відносна похибка вимірювання (δ_A) являє собою відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини, виражене у відсотках (або у долях одиниці):

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Абсолютна похибка вимірюється у тих же одиницях, що і вимірювана величина, що виключає можливість порівняння абсолютних похибок вимірювання величин, що мають різну розмірність. Для порівняння похибок величин різної розмірності можна використовувати відносну похибку.

Похибка вимірювання є мірилом точності цих вимірювань – чим вона менша, тим точнішим є вимірювання. У загальному випадку, тим не менше, абсолютні похибки залежать від значення вимірюваної величини і тому не можуть бути використані для характеризувати кількісної характеристики точності вимірювань. Натомість, відносні похибки цього недоліку позбавлені.

Точність вимірювань – це число, яке є зворотним до значення відносної похибки. Наприклад, відносна похибка вимірювання складає 0,025 (або 2,5%), тоді точність даного вимірювання дорівнює: $1/0,025 = 40$.

Вираз (3.1) є ідеалізованою формулою, використання якої є неможливим через те, що істинне значення вимірюваної величини є невідомим. Дане твердження вимагає застосування способів оцінювання вимірювань з використанням непрямих (неявних) даних.

Складовими компонентами вимірювання є визначення методу і засобів вимірювання та можуть здійснюватися автоматично або за участю людини. Кожна з цих компонент здійснюють свій внесок у загальне значення похибки вимірювання, що математично можна записати наступним чином:

$$\Delta A = \Delta A_m + \Delta A_{зб} + \Delta A_{л} \quad (3.3)$$

де ΔA_m – похибка, що викликана обраним методом вимірювання,

$\Delta A_{зб}$ – похибка, що викликана застосованим засобом для проведення вимірювання,

$\Delta A_{л}$ – похибка, що викликана впливом «людського фактору».

При здійсненні електротехнічних вимірювань розрізняють кілька видів похибок, які можна об'єднати в дві великі групи: основні і додаткові. Основна похибка визначається при нормальних умовах роботи (відповідних параметрах навколишнього середовища та заздалегідь визначених характеристиках електричних параметрів). Додаткова похибка з'являється при відхиленні величин, що впливають на результат вимірювання, від нормальних.

Основна похибка включає в себе дві складові: систематичну і випадкову.

Систематична похибка при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини одним і тим же вимірювальним приладом залишається

постійною або змінюється за певним законом. Цю похибку досить легко виявити та виокремити з результату вимірювань. Джерелами систематичних похибок можуть бути: методичні чинники, характеристики використовуваних засобів вимірювання, «людський фактор».

Методичні похибки можуть бути пояснені недостатньою розробленістю теорії і практики вимірювань та неточністю використовуваних співвідношень, що використовуються для оцінки значення вимірюваної величини.

Похибки засобів вимірювання викликані недосконалістю конструкції цих засобів, їхнім моральним та фізичним зношенням та таких, що знаходяться під впливом зовнішніх природних факторів.

Похибки, викликані «людським фактором» пояснюється впливом індивідуальних особливостей тієї особи, що проводить вимірювання, на результати даного вимірювання.

Для зменшення систематичної похибки необхідне попереднє настроювання і калібрування приладів та введення поправок.

Випадкова похибка при повторних вимірюваннях може змінюватися випадковим чином і різко виділяється на тлі появи систематичної похибки. Основним способом зменшення випадкової похибки є обробка результатів вимірювань методами статистики та теорії ймовірності.

Похибки прямих вимірювань

Для кількісної оцінки основної систематичної похибки при прямих вимірах необхідно визначити абсолютну, дійсну відносну і приведену відносну похибки вимірювання. Причому, на практиці значення похибки вимірювання можна оцінити лише приблизно.

Абсолютна похибка вимірювання (Δ) – це відхилення результату вимірювання (за яке беруть показаннями приладу – A) від істинного значення (за яке беруть показання зразкового приладу – A_i), взяте по модулю:

$$\Delta = |A - A_i| \quad (3.4)$$

Граничні значення абсолютних похибок можуть бути як позитивними, так і негативними, але однаковими за модулем.

Як було зазначено вище, істинне значення вимірюваної величини нам невідомо, тому замість нього використовують «дійсне значення».

Дійсне значення – значення вимірюваної величини, що знаходиться експериментальним шляхом за допомогою зразкового приладу.

У деяких випадках з метою отримання дійсного значення вводять поправки, які враховують похибки засобів вимірювань.

Зауваження: величини A та A_i у формулі (3.4) повинні мати однакову розрядність.

Приклад 3.1. Дійсне значення вимірної вольтметром напруги складає $U_0 = 15,6 \text{ В}$, розрахована похибка вимірювань складає $\pm 1,234 \text{ В}$.

Результат вимірювання запишеться:

$$U = 15,6 \pm 1,2 \text{ В} - \text{вірно}, \\ U = 15,6 \pm 1,234 \text{ В} - \text{не вірно}.$$

Абсолютна похибка є її кількісною характеристикою, а для визначення якісного боку вимірювання використовується дійсна відносна похибка вимірювання.

Дійсна відносна похибка – це відношення абсолютної похибки до показань вимірювального приладу і виражається у відсотках:

$$\delta_0 = \frac{\Delta}{A} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

Приклад 3.2. Маємо міліамперметр, призначений для вимірювання постійного струму до 100 мА. Максимальна абсолютна похибка приладу на всій протяжності його шкали дорівнює 2,5 мА. Розрахувати відносну похибку приладу при значенні вимірюваного струму: 1) $I_1 = 20 \text{ мА}$, 2) $I_1 = 50 \text{ мА}$, 3) $I_1 = 100 \text{ мА}$.

Розв'язання: для відповіді на поставлене запитання скористаємося формулою (3.5), у якій $\Delta = \Delta_I = 2,5 \text{ мА}$; 1) $A = I_1 = 25 \text{ мА}$, 2) $A = I_2 = 50 \text{ мА}$, 3) $A = I_3 = 100 \text{ мА}$. Дійсна відносна похибка для кожного випадку вимірювань складе:

$$\begin{aligned} 1) \delta_{01} &= \frac{2,5}{25} \cdot 100\% = 10\%, \\ 2) \delta_{02} &= \frac{2,5}{50} \cdot 100\% = 5\%, \\ 3) \delta_{03} &= \frac{2,5}{100} \cdot 100\% = 2,5\%. \end{aligned}$$

Висновок, який можна зробити за результатами розрахунків, – для досягнення менших значень помилки вимірювань даним приладом рекомендується здійснювати ці вимірювання у другій половині його шкали.

Наведена відносна похибка – це відношення найбільшої абсолютної похибки ($\Delta_{\max}$) до деякого номінального або нормуючого значення (A_n), що виражається у відсотках:

$$\delta_{\text{нав.}} = \frac{\Delta_{\max}}{A_n} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

Номинальне (нормуюче) значення визначається безпосередньо за шкалою приладу вимірювання або за формулою:

$$A_n = A_{max} - A_{min}, \quad (3.7)$$

де A_{max} – верхня межа шкали приладу (найбільше значення на шкалі приладу),

A_{min} – нижня межа шкали приладу (найменше значення на шкалі приладу).

Для приладів з односторонньою шкалою номінальне значення завжди дорівнює верхній межі шкали приладу. У багатограничних приладах з односторонньою шкалою номінальне значення визначається положенням перемикача меж вимірювань.

Наведена відносна похибка не залежить від показань аналогового приладу, тому її значення покладено в основу класу точності електровимірювальних приладів.

Клас точності вказується на шкалі приладу. У теперішній час електровимірювальним приладам відповідно до стандарту присвоєно дев'ять класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 3; 4; 5. Прилади класів точності від 0,01 до 0,5 включно називаються прецизійними і використовують для точних лабораторних досліджень. Прилади класів точності від 1,0 до 4,0 включно – технічні, вище 4,0 – позакласові. Клас точності приладу вказується на лицьовій панелі та може слугувати порівняльною характеристикою однотипних приладів.

Клас точності, що характеризує наведену відносну похибку, не є прямим і однозначним показником точності вимірювань через те, що похибка вимірювання залежить не лише від класу точності, але і від безпосередніх показань приладу (див. Приклад 3.3).

Знаючи клас точності приладу, можна визначити абсолютну похибку приладу, яка на обраній межі вимірювань є постійною:

$$\Delta A_{max} = \frac{\delta_{A_{max}} \cdot A_{max}}{100\%} \quad (3.8)$$

Приклад 3.3. Клас точності амперметра дорівнює 1,5, найбільше значення на шкалі аналогового приладу дорівнює 50 А. Визначити значення максимальної абсолютної похибки.

Розв'язання: для відповіді на поставлене запитання скористаємося формулою (3.8), у якій $\delta_{A_{max}} = 1,5$, $A_{max} = 50$ А. Максимальна абсолютна похибка складе:

$$\Delta A_{max} = \frac{1,5 \cdot 50}{100\%} = 0,75 \text{ В.}$$

Отже, при прямих вимірюваннях похибка визначається класом точності приладу в разі, коли вимірювання здійснюється одним приладом. Якщо вимірювальний пристрій складається з кількох засобів вимірювання (m), кожен з яких має свою похибку (абсолютну – Δ_i або відносну – δ_i) говорять про **сумарну похибку**.

Абсолютна сумарна похибка розраховується за формулою:

$$\Delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_i^2} \quad (3.9)$$

Відносна сумарна похибка розраховується за формулою:

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta_i^2} \quad (3.10)$$

Приклад 3.4. Показання амперметра, що має відносну сумарну похибку складає $\delta_A = 1,0\%$, складає 50 А і який підключено через трансформатор струму з відносною сумарною похибкою $\delta_{TC} = 1,5\%$. Визначити значення сумарної абсолютної та відносної похибки.

Розв’язання: для відповіді на поставлене запитання скористаємося формулами (3.10) і (3.6), у яких $\delta_1 = \delta_A = 1,0\%$, $\delta_2 = \delta_{TC} = 1,5\%$, $A = I = 50$ А. Відносна сумарна похибка складе:

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{1,0^2 + 1,5^2} = \pm 1,803\%$$

Абсолютна сумарна похибка складе:

$$\Delta_{\Sigma} = \pm \frac{50 \cdot 1,803}{100} = \pm 0,902 \text{ А}$$

Результат вимірювання запишеться: $I = 50,0 \pm 0,9 \text{ А}$.

Похибки непрямих (опосередкованих) вимірювань

При непрямих (опосередкованих) вимірюваннях необхідно мати математичну залежність, яке пов’язує величини, що вимірюються приладами. У загальному випадку:

$$f = f(x, y, z) \quad (3.11)$$

тут x – величина, виміряні з похибкою Δ_x , y – з похибкою Δ_y , z – з похибкою Δ_z , відповідно.

Абсолютна похибка результату вимірювання при непрямих вимірюваннях розраховується за формулою:

$$\Delta = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right) \Delta_x\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right) \Delta_y\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right) \Delta_z\right]^2} \quad (3.12)$$

де $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right), \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right), \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)$ – приватні похідні від залежності (3.11) по відповідній змінній.

Відносна похибка результату вимірювання при непрямих вимірюваннях розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta}{A} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right) \frac{\Delta_x}{A}\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right) \frac{\Delta_y}{A}\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right) \frac{\Delta_z}{A}\right]^2} \quad (3.13)$$

Приклад 3.5. Електрична потужність у ланцюзі постійного струму визначається за залежністю: $P = U \cdot I$. За допомогою вольтметра була виміряна напруга $U = 25$ В з абсолютною похибкою вимірювання $\Delta_U = 2,0$ В. За допомогою амперметра було виміряно струм $I = 12$ А з абсолютною похибкою вимірювання $\Delta_I = 1,5$ А. Записати результати вимірювання.

Розв’язання: визначаємо приватні похідні по напрузі і по струму від заданої залежності для потужності:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial U} &= \frac{\partial(U \cdot I)}{\partial U} = I, \\ \frac{\partial P}{\partial I} &= \frac{\partial(U \cdot I)}{\partial I} = U \end{aligned}$$

Абсолютну похибку непрямого вимірювання визначаємо за (3.13):

$$\begin{aligned} \Delta_P &= \sqrt{\left[\left(\frac{\partial P}{\partial U}\right) \cdot \Delta_U\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial P}{\partial I}\right) \Delta_I\right]^2} = \sqrt{I^2 \cdot \Delta_U^2 + U^2 \cdot \Delta_I^2} = \\ &= \sqrt{12^2 \cdot 2^2 + 25^2 \cdot 1,5^2} = 44,52 \text{ ВА} \end{aligned}$$

Визначаємо потужність, виміряну опосередковано за заданою згідно умов задачі формулою:

$$P = U \cdot I = 25 \cdot 12 = 300 \text{ ВА}$$

Результат вимірювання запишеться: $P = 300,0 \pm 44,5 \text{ ВА}$.

Висновки: Вимірювання електричних величин неможливо здійснити з «нульовою похибкою», що пояснюється фізичним обмеженням параметрів точності засобів вимірювань. Останнє пояснюється багатьма об'єктивними чинниками: принципом невизначеності, випадковими флуктуаціями вимірювання (шумами) – броунівським рухом, шумами опорів, наявністю дискретності матеріалів, виникненням різних перешкод та паразитних коливань вимірюваних величин, наявністю зовнішніх впливів та інше.

Зміст звіту

У звіті навести:

- основні поняття, пов'язані з похибками вимірювань,
- визначити джерела виникнення похибок вимірювань,
- занотувати формульні залежності для визначення похибок прямих вимірювань з прикладами,
- занотувати класи точності електровимірювальних приладів встановлених стандартом,
- занотувати формульні залежності для визначення похибок непрямих (опосередкованих) вимірювань з прикладом.
- письмово відповісти на контрольні питання та виконати поставлені завдання.

Контрольні питання та завдання

1. Поясніть різницю між істинним і дійсним значенням вимірюваної величини.
2. Визначити поняття «похибка вимірювання» та зазначити їх джерела.
3. У яких одиницях вимірюється абсолютна похибка, відносна похибка?
4. Яким чином на появу похибки впливає «людський фактор»?
5. Яку похибку покладено в основу зазначення класу точності електровимірювальних приладів?
6. Яким чином визначається номінальне (нормуюче) значення електровимірювального приладу?
7. Зазначте алгоритм визначення похибки непрямих (опосередкованих) вимірювань?

Література: [7, 8, 10].

Практична робота №4

ОГЛЯД КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ ОСНОВНИХ ТИПІВ СТІЛОЧНИХ ПРИЛАДІВ

Мета заняття: Вивчити основні конструктивні особливості та принцип дії систем електровимірювальних приладів.

Прилади магнітоелектричної системи

У принцип дії приладів магнітоелектричної системи покладено взаємодію магнітного поля постійного магніту з поміщеною у це поле рухомою котушкою, через яку протікає струм (рис. 4.1).

Прилад даної системи складається з нерухомої частини, яка являє собою підковоподібний магніт 1 з полюсними наконечниками 2, які виконують з магнітомягкої сталі та мають циліндричну форму розточки під розміщення котушки. У просторі між полюсними наконечниками нерухомо закріплено сталевий сердечник циліндричної форми 3, призначення якого полягає у створенні в повітряному зазорі між полюсними наконечниками і циліндричним сердечником рівномірного поля, що має радіальну спрямованість. У повітряному зазорі розташовується рухома котушка 4, яку виконано з тонкого ізолюваного проводу, намотаного на алюмінієвий каркас прямокутної форми (каркас може бути відсутній). Кінці даної обмотки з'єднуються зі спіральними пружинами 6 (у якості яких можуть бути розтяжки або підвіси), що закріплені на ізолюваних сталевих напівосях 5 рамки. Пружини своїми вільними кінцями приєднано до зовнішніх провідників, через які до котушки підводиться струм. Таким чином, пружини виступають струмопровідними частинами, через що їх виготовляють з фосфористої бронзи. Крім підведення до котушки струму, пружини створюють протидіючий момент для протидії оберտальному моменту під дією струму вимірювальної величини та повернення рухомої системи у початкове положення у відключеному стані.

На осі жорстко закріплено стрілку 7, напрямок відхилення стрілки приладів даної системи залежить від напрямку вимірюваного струму, тому при включенні їх в ланцюг змінного струму на рухливу котушку діють швидкоплинні за значенням і напрямком механічні сили, середнє значення яких дорівнює нулю, що визначає область використання приладів магнітоелектричної системи – вони придатні лише для здійснення вимірювань у ланцюгах постійного струму.

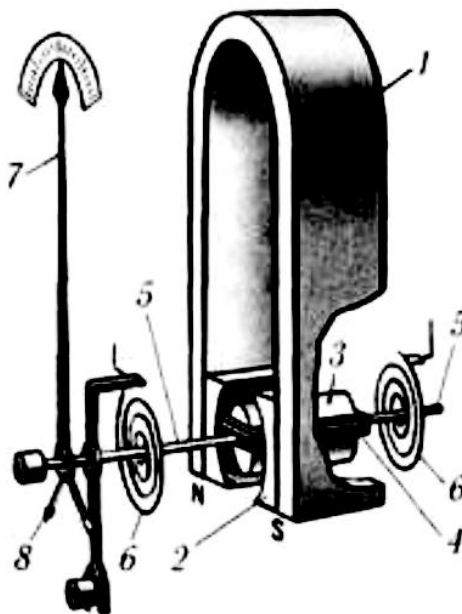


Рисунок 4.1 – Конструктивне виконання приладу магнітоелектричної системи (позначення у тексті)

Сила (F), з якою магнітне поле постійного магніту діє на рамку зі струмом (I), залежить від величини струму і магнітної індукції поля (B), яка визначається за залежністю:

$$B = S \cdot \Phi, \quad (4.1)$$

де S – площа рамки, м^2 ,

Φ – магнітний потік, Вб.

У результаті силового впливу постійного магнітного поля на рамку зі струмом створюється обертаючий момент, який змушує рамку обертатися:

$$M_{об.} = s \cdot w \cdot \Phi \cdot I, \quad (4.2)$$

де s – площа рамки, м^2 ,

w – число витків, шт.

Через жорсткий зв'язок стрілки вимірювального приладу з віссю рамки, стрілка приладу починає переміщуватися вздовж шкали. Обертальний момент $M_{об.}$ при певному куті повороту врівноважується протидіючим моментом $M_{пр.}$, що створюється пружиною:

$$M_{пр.} = c \cdot \alpha, \quad (4.3)$$

де c – пружність пружини, $\text{Н} \cdot \text{м}/\text{град}$.

При рівності моментів $M_{об.} = M_{пр.}$ стрілка встановлюється у певному положенні. Кут повороту стрілки визначається залежністю:

$$\alpha = S \cdot I, \quad (4.4)$$

де $S = \frac{s \cdot w \cdot \Phi}{c}$ – чутливість приладу

Із залежності (4.4) виходить, що кут відхилення стрілки прямо пропорційний величині вимірюваного струму і визначає рівномірність шкали магнітоелектричного приладу.

Напрямок обертального моменту визначається за правилом «лівої руки» і є однозначним, що вимагає обов'язкового дотримання полярності при підключенні до вимірювального ланцюга постійного струму.

Для здійснення вимірювань у ланцюгах змінного струму за допомогою магнітоелектричних приладів необхідним є застосування спеціальних перетворювачів змінного струму в постійний або пульсуючий.

Прилади магнітоелектричних систем при прямому підключенні розраховані на струми не більше 200 мА. При більших струмах відбувається неприпустимий нагрів спіральних пружин (розтяжок або підвісів) через те, що вони є струмопровідними елементами. Для розширення меж вимірювання приладів даної системи по струму використовують шунти, які включають паралельно приладу для того, щоб тільки розрахована частина вимірюваного струму проходила через котушку самого приладу.

Переваги магнітоелектричних приладів:

- висока чутливість,
- висока точність вимірювань,
- незначне власне споживання потужності,
- незначна залежність від зовнішніх магнітних полів і температури навколишнього середовища,
- рівномірність шкали по всій її довжині,
- широкі діапазони вимірювань значень струму і напруги при застосуванні додаткових елементів,
- швидке заспокоєння рухомої системи.

Недоліки магнітоелектричних приладів:

- низька перевантажувальна здатність,
- необхідність застосування спеціальних перетворювачів при здійсненні вимірювань у ланцюгах змінного струму.

Прилади електромагнітної системи

У приладах електромагнітної системи для створення обертаючого моменту використовується силовий вплив магнітного поля нерухомої котушки 1 на рухомий сердечник 2, виконаний з магнітом'якої сталі, закріплений на осі ексцентрично (рис. 4.2).

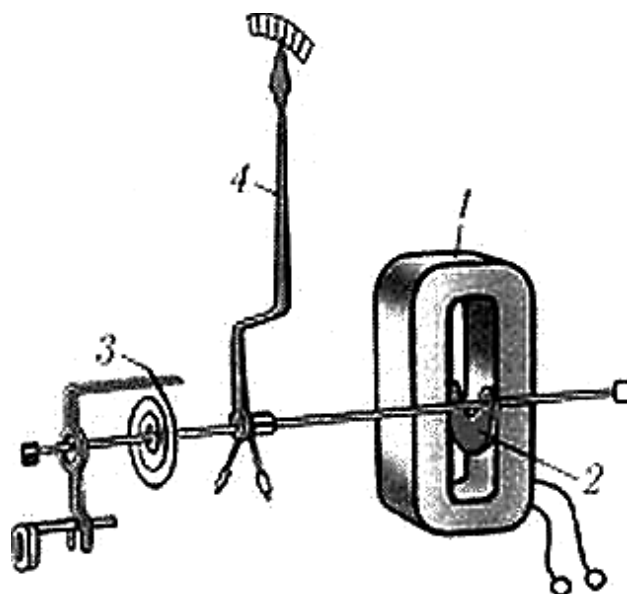


Рисунок 4.2 – Конструктивне виконання приладу електромагнітної системи (позначення у тексті)

Під впливом магнітного поля, створеного вимірюваним струмом (I), сердечник 2 втягується в котушку, повертаючи вісь 3 із закріпленою на ній вказівною стрілкою 4. Сила (F), з якою сердечник втягується в котушку, залежить від величини струму і магнітної індукції в осерді. Наближено приймають, що сила F і обумовлений нею момент $M_{об.}$ пропорційні квадрату вимірюваного струму, що проходить через котушку.

$$M_{об.} = k_1 \cdot I^2, \quad (4.5)$$

k_1 – коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструктивних особливостей приладу.

Момент $M_{об.}$ при певному куті повороту врівноважується протидіючим моментом $M_{пр.}$, що створюється пружиною 3, що можна записати аналогічно до рівняння (4.3). Стрілка встановлюється у певному положенні при рівності моментів $M_{об.} = M_{пр.}$, кут відхилення стрілки приладу складе:

$$\alpha = \frac{k}{c} I^2 \quad (4.6)$$

Залежність (4.5) показує, що кут відхилення стрілки є функцією квадрату вимірюваного струму, і шкали цих приладів у більшості нерівномірні (іноді рівномірності шкали можна досягти шляхом вибору форми якоря). При нерівномірності шкали, вимірювання на початку шкали можуть мати або дуже велику похибку, або взагалі неможливі – цю зону називають «зоною нечутливості» даного приладу.

Прилад може бути використаний для вимірювання як постійних, так і змінних струмів, через те, що зміна напрямку струму не змінює знак кута α

через його пропорційність квадрату струму. При вимірюванні змінних струмів прилад показує дійсне (середньоквадратичне) значення вимірюваної величини.

Переваги електромагнітних приладів:

- простота конструкції,
- здатність працювати у колах постійного та змінного струмів,
- висока перевантажувальна здатність,
- висока надійність роботи,
- відносно низька вартість.

Недоліки електромагнітних приладів:

- невисокий клас точності,
- низька чутливість, через те, що магнітний потік більшу частину шляху проходить по повітрю,
- значне власне споживання енергії,
- залежність показань від зовнішніх магнітних полів,
- обмеженість діапазону частот (не більше 8000 Гц),
- нерівномірність шкали.

Прилади електродинамічної системи

У принцип дії приладів електродинамічної системи покладено взаємодію провідників зі струмами. Відомо, що два провідники, по яким протікає струм, взаємно притягуються при співпадінні напрямків і відштовхуються при різних напрямках струмів.

Дана системи складається з двох котушок: нерухомої 1 (яка містить дві секції, які з'єднані між собою послідовно) і рухомої 2, закріпленої на осі, та має змогу обертатися всередині нерухомої котушки. Струм до рухомої котушки підводиться через закріплені на осі спіральні пружинки 3, які одночасно створюють протидіючий обертальний момент, пропорційний куту закручування (пружинки електрично-ізолювані від осі); на осі рухомої котушки закріплено вказівник – стрілка 4 (іноді до осі прикріплюється повітряний заспокоювач). Рухому котушку виконують з тонкого ізолюваного дроту, що дозволяє підвищити клас точності та чутливість приладу.

Струми I_1 , підведений до нерухомої котушки, і струм I_2 , підведений до рухомої котушки, створюють обертальний момент, що розраховується за формулою:

$$M_{об.} = k_2 \cdot I_1 \cdot I_2 \quad (4.7)$$

де k_2 – коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструктивних особливостей приладу,

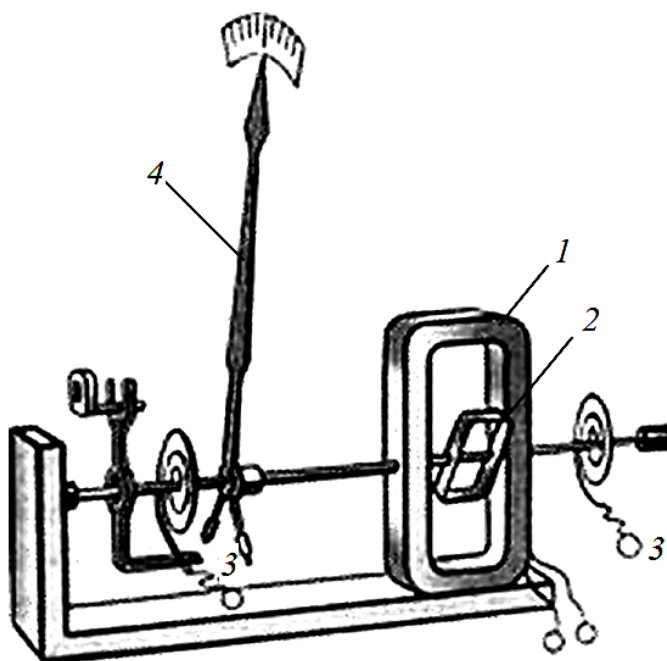


Рисунок 4.3 – Конструктивне виконання приладу електродинамічної системи (позначення у тексті)

Протидіючий момент $M_{np.}$ створюється пружинами, який можна визначити за рівнянням (4.3). При рівності моментів $M_{об.} = M_{np.}$, стрілка встановлюється у певному положенні, кут відхилення стрілки приладу складе:

$$\alpha \equiv \frac{k_2}{c} I_1 I_2 \quad (4.8)$$

Знак ($\equiv$) означає пропорційність кута відхилення стрілки добутку струмів і шкали приладів з даною системою є нерівномірними.

При змінному струмі крутний момент в будь-який момент часу пропорційний добутку миттєвих значень струмів:

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{1m} \cdot \sin \omega t, \\ i_2 &= I_{2m} \cdot \sin (\omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (4.9)$$

де φ – кут зсуву фаз між струмами I_{1m} і I_{2m} ,

Показання приладу в цьому випадку визначаються середнім значенням крутного моменту за період T :

$$M_{об.} = \int_0^T c \cdot I_{1m} \cdot \sin \omega t \cdot I_{2m} \cdot \sin(\omega t + \varphi) dt = c \cdot I_1' \cdot I_2' \cdot \cos \varphi, \quad (4.10)$$

де I_1' і I_2' – діючі значення змінних синусоїдальних струмів i_1 і i_2 , відповідно.

Таким чином, кут відхилення стрілки електродинамічного приладу в ланцюзі змінного струму прямо пропорційний добутку струму в нерухомій котушці, струму в рухомій котушці та косинуса кута зсуву фаз φ між векторами цих струмів. Отже, шкала електродинамічного приладу є нерівномірною (за винятком електродинамічних ватметрів, побудованих на цій системі).

Перевагами електродинамічних приладів є:

- висока точність вимірювань,
- здатність працювати у ланцюгах постійного і змінного струму,

Недоліками електродинамічних приладів є:

- відносно низька чутливість,
- залежність показань від зовнішніх магнітних полів,
- недопустимість перевантажень,
- значні втрати потужності при вимірюванні,
- складність конструкції, що викликає відносно високу вартість,
- нерівномірність шкали при вимірюванні струмів і напруг.

Прилади електростатичної системи

У принцип дії приладів електростатичної системи покладено виникнення сили взаємодії заряджених електродів 1 і 2, що створює крутий момент, який відхиляє покажчик, протидіючий момент створюється спіральною пружиною 3 (рис. 4.4).

Фізично – це звичайний електростатичний конденсатор, виконаний у вигляді двох паралельних пластин, які перебувають на невеликій відстані один від одного. При подачі напруги (U) на конденсатор на поверхні пластин з'являється електричний заряд (Q), що приводить до виникнення електричного поля (E). Рухома пластина з зарядом Q у полі E притягується до нерухомої з силою F , яка визначається залежністю:

$$F = Q \cdot E \quad (4.11)$$

Для врівноваження даної сили використовується пружина.

Величина заряду і напруженість електричного поля прямо пропорційні напрузі U , а сила пружини пропорційна величині зсуву. Таким чином, зміщення рухомої частини приладу буде пропорційною квадрату вимірюваної напруги U .

Незважаючи на квадратичну залежність переміщення від напруги, шкали електростатичних приладів по більшості є лінійними та розмічені не в одиницях квадрату напруги, а в одиницях ефективного або діючого значення напруги:

$$U_{ef.} \equiv \sqrt{U^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}, \quad (4.12)$$

Забезпечення лінійності шкали забезпечується спеціальною формою рухливого електрода.

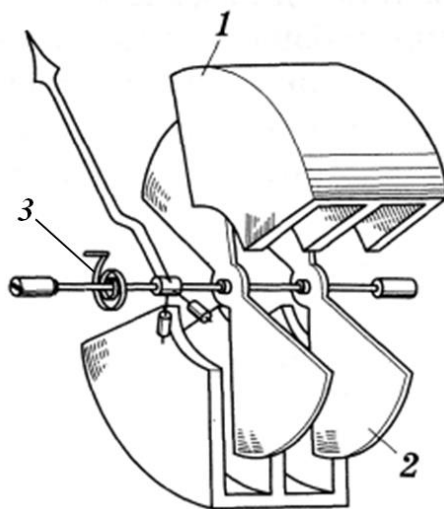


Рисунок 4.4 – Конструктивне виконання приладу електростатичної системи (позначення у тексті)

Відмінною особливістю приладів електростатичної системи є дуже високий внутрішній опір (при постійному струмі він досягає величини до 10^{16} Ом). Завдяки високому опорі заряд на електродах вимірювальної системи зберігається довго, тому для установки нуля приладу необхідно замкнути його клемами.

Перевагами електростатичних приладів є:

- при вимірюванні постійної напруги прилад є практично ідеальним вольтметром,
- можна безпосередньо вимірювати великі значення напруг,
- при вимірюванні змінних напруг частотний діапазон робочих частот знаходиться в межах 10–20 МГц, при цьому вхідний опір носить ємнісний характер.

Недоліками електростатичних приладів є:

- низька чутливість,
- прилад здатен вимірювати лише напругу.

Прилади індукційної системи

Робота приладів індукційної системи заснована на використанні явища виникнення обертового (або такого, що біжить) магнітного поля, та на здатності цих полів створювати обертальний момент, яке діє на рухоме металеве тіло, що розміщено у такому полі.

Індукційні прилади застосовують для вимірювання струму, напруги, потужності і енергії в ланцюгах змінного струму. Принцип дії індукційних приладів розглянемо на прикладі роботи лічильника електричної енергії змінного однофазного струму (рис. 4.5).

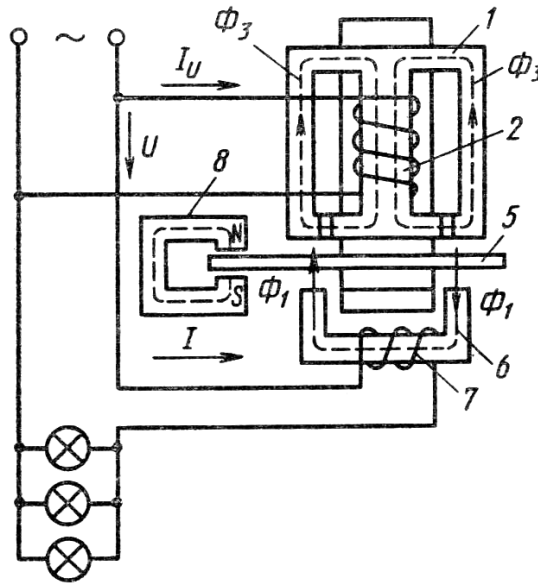


Рисунок 4.5 – Конструктивне виконання приладу індукційної системи (позначення у тексті)

Рухома частина приладу являє собою алюмінієвий диск 5, закріплений на осі 4. Нерухома частина сердечника складається з двох електромагнітів 1 і 6 з намагнічуючими котушками 2 і 7 відповідно. Електромагніт 1 є тристрижневим, а котушка 2 складається з великої кількості витків ізоляованого провідника малого перетину. Магнітне поле, що біжить (Φ_1), створюване струмами у котушках, індукує в алюмінієвому рухомому диску вихрові струми. Взаємодія магнітного поля, що біжить, з вихровими струмами створює крутний момент, який змушує диск обертатися в ту ж сторону, в яку обертається поле. Протидіючий момент створюється в результаті взаємодії поля постійного магніту (8) з вихровими струмами, що наводяться полем у алюмінієвому диску, який обертається. Електрична енергія, що обраховується лічильником, пропорційна частоті обертання диска. Для цього лічильник має рахунковий механізм, який пов'язаний черв'ячною передачею з віссю диска.

Переваги індукційних лічильників:

- висока надійність в роботі,
- значна перевантажувальна здатність по струму,
- незначна чутливість до зовнішніх магнітних полів.

Недоліки індукційних лічильників:

- призначені для роботи у ланцюгах змінного струму тільки однієї визначеної частоти,
- залежність показань приладу від температури навколишнього середовища.

Зміст звіту

У звіті навести:

- занотувати принципи дії та устрій приладів представлених систем,
- визначити область їх застосування, переваги та недоліки,
- письмово відповісти на контрольні питання та виконати поставлені завдання.

Контрольні питання

1. У яких ланцюгах використовуються прилади магнітоелектричної системи?
2. Що характеризує параметр «чутливість приладу»?
3. Яке значення вимірюваної величини реєструють електромагнітні прилади?
4. З якої причини шкали приладів електродинамічної системи нерівномірні?
5. З якою метою у приладах електростатичної системи замикають його клемами?
6. Які величини можна вимірювати приладами індукційної системи?

Література: [9, 10, 11, 12].

Практична робота №5

ОГЛЯД ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ ЦИФРОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

Мета заняття: Здійснити огляд функціональних схем цифрових вимірювальних приладів.

Загальні відомості

Цифровими називаються вимірювальні прилади, які автоматично перетворюють безперервні аналогові сигнали вимірювальної інформації і представляють їх у дискретній цифровій формі, за винятком деяких приладів, що вимірюють дискретні величини. Процес цифрового кодування безперервної величини є сукупністю квантування (дискретизації) цієї величини за рівнем і за часом – відбувається автоматичне перетворення вхідної вимірюваної величини в цифровий код.

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) обов'язково мають два вузла: аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і цифровий відліковий пристрій (ЦВП). До зазначених АЦП і ЦВП у цифрових приладах містяться також цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП). АЦП і ЦАП можуть бути використані у якості автономних пристроїв.

У результаті квантування вимірюваної величини за рівнем виникає деяка похибка дискретності, обумовлена тим, що нескінченність значень вимірюваної величини відображається лише обмеженою кількістю показань ЦВП.

Зазначена похибка дискретності не перешкоджає досягненню заданих показників точності приладів, через можливість зменшення цієї похибки шляхом вибору числа рівнів квантування. Дискретизація безперервної величини $x(t)$ за часом проводиться з метою перетворення $x(t)$ в дискретну (переривчасту) в часі величину, яка збігається з відповідними значеннями $x(t)$ тільки в певні моменти часу.

За конструкцією ЦВП можна розділити на електромеханічні та електронні. У перших використовуються контактні елементи (крокові двигуни, реле), у других – безконтактні елементи (електронні та/або напівпровідникові).

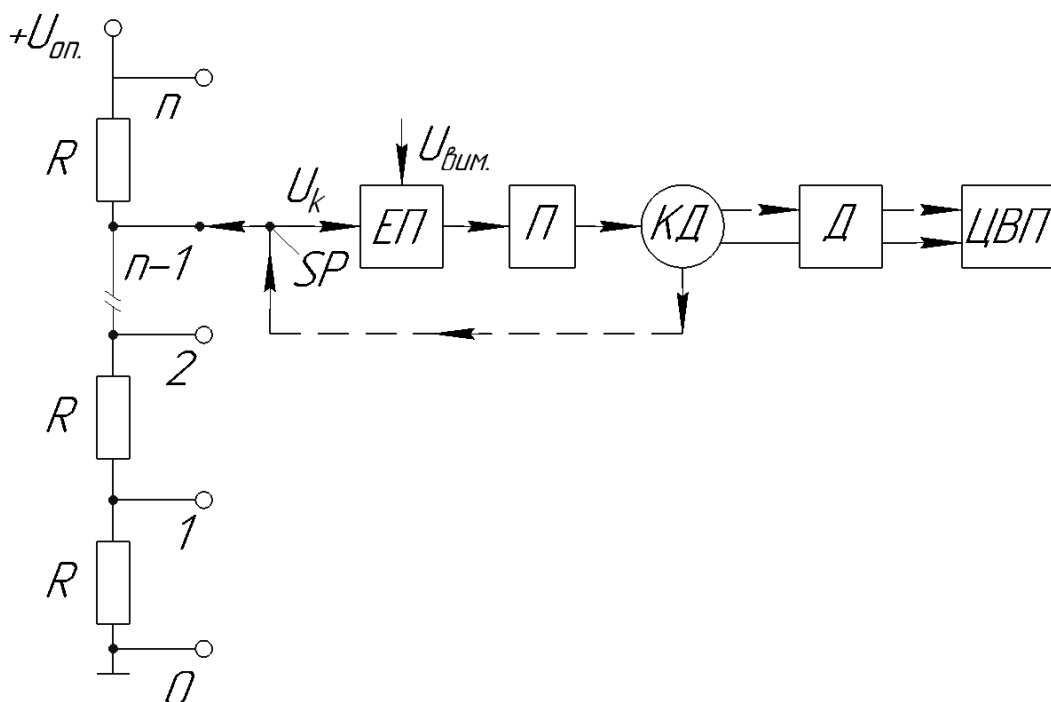
У залежності від перетворення вимірюваної величини в код, ЦВП поділяють на прилади послідовного перетворення, просторового перетворення, порозрядного врівноваження (кодоімпульсні).

За родом вимірюваної величини ЦВП поділяють на вольтметри, частотоміри, омметри, фазометри і т.п.

У більшості випадків ЦВП є універсальними, що дозволяє одним приладом вимірювати різні електричні величини: постійних і змінних напруг, постійних і змінних струмів, електричних опорів й інш.

Електромеханічні цифрові прилади

Електромеханічні (або контактні) цифрові прилади складаються крокові двигуни, реле, перемикачі і т.п. Через значний час вимірювання і невеликий термін служби, вони не отримали широкого застосування. Перевагою цих приладів є незначна похибка. На рис. 5.1 наведено функціональну схему електромеханічного цифрового вольтметра, призначеного для вимірювання постійних напруг.



$U_{вим.}$ – вимірювана напруга, $КД$ – кроковий двигун, $U_{оп.}$ – опорна напруга, $Д$ – дешифратор, $ЕП$ – елемент порівняння, $ЦВП$ – цифровий відліковий пристрій, $П$ – підсилювач, SP – перемикач

«—» – електричні зв'язки, «- -» – механічні зв'язки

Рисунок 5.1 – Функціональна схема електромеханічного цифрового вольтметра

Кроковий двигун $КД$ може бути пов'язаний з $Д$ і $ЦВП$ електричним або механічним зв'язком, у залежності від конструктивного виконання конкретного типу приладу.

Компенсуюча напруга U_k , що подається на $ЕП$ для порівняння зі значенням вимірюваної напруги $U_{вим.}$, U_k визначається співвідношенням:

$$U_k = \frac{U_{вим.}}{n} \cdot n_i, \quad (5.1)$$

де n – число опорів R (загальне число ступенів дільника напруги);

n_i – число включених ступенів дільника напруги.

Напруга U_k змінюється ступінчасто з дискретністю:

$$\Delta U_k = \frac{U_{on.}}{n}, \quad (5.2)$$

Значення ΔU_k визначає похибку дискретності приладу, яка може бути обмежена завдяки відповідним конструктивним і технічним параметрам і залежить від числа опорів, що утворюють дільник напруги.

Значення ΔU на виході елемента порівняння напруги дорівнює різниці напруг $U_{вим.}$ і U_k :

$$\Delta U_k = U_{вим.} - U_k, \quad (5.3)$$

У разі, коли $U_{вим.} \neq U_k$, то різниця ΔU подається на вхід підсилювача $П$ і після посилення впливає на кроковий двигун $КВ$, який починає переміщувати рухливий контакт перемикача SP . При цьому змінюється значення компенсуючої напруги U_k , що знімається з дільника. Збільшення U_k (в разі, коли $U_{вим.} > U_k$) або його зменшення (в разі, коли $U_{вим.} < U_k$) відбувається до тих пір, поки U_k не стане приблизно дорівнювати значенню напруги $U_{вих.}$. При цьому кроковий двигун $КД$ зупиняється і з ЦВП починається відлік показань.

Замість крокового двигуна може бути використано електромеханічне реле для здійснення необхідної комутації у вимірювальних ланцюгах.

Швидкодія електромеханічних цифрових вимірювальних приладів становить 1–2 вимірювання за секунду. Клас точності таких приладів від 0,005 до 0,05.

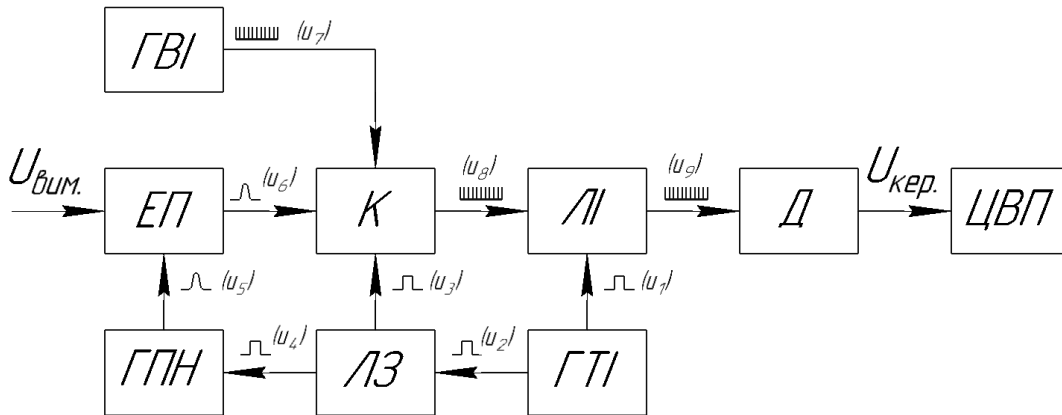
Електронні цифрові прилади

Часоімпульсні вольтметри

Часоімпульсні вольтметри відносяться до приладів послідовного перетворення, принцип дії яких засновано на перетворенні вимірюваної напруги у часовий інтервал і вимірюванні отриманого інтервалу шляхом заповнення його високочастотними імпульсами (рис. 5.2).

Генератор тактових імпульсів ($ГТІ$) задає такт роботі приладу, виробляючи із заданою періодичністю прямокутні імпульси u_1 і u_2 . Імпульс u_1 надходить на лічильник імпульсів ($ЛІ$) і переводить його в початковий стан. Імпульс u_2 подається на лінію затримки ($ЛЗ$). Через деякий час (час затримки) на виході $ЛЗ$ з'являються імпульси u_3 і u_4 : імпульс u_3 подається на ключ ($К$) і відкриває його; імпульс u_4 потрапляє на генератор пилоподібної напруги ($ГПН$) і запускає його. З виходу $ГПН$ пилоподібна напруга u_5 надходить на елемент порівняння ($ЕП$), куди одночасно подається вимірювана напруга $U_{вим.}$. Через відкритий ключ $К$ високочастотні імпульси u_7 надходять на $ЛІ$. Підрахунок імпульсів лічильником імпульсів триває до тих пір, поки напруги $U_{вим.}$ і u_5 не

зрівняються і $ЕП$ не виробить імпульс u_6 , який закриє ключ K . Число імпульсів, накопичене в лічильнику $ЛІ$, перетворюється дешифратором ($Д$) у керуючу напругу $U_{кер.}$, що впливає на цифровий відліковий пристрій ($ЦВП$), з якого і починається відлік результату вимірювання.



$ГТІ$ – генератор тактових імпульсів, $ГПН$ – генератор пилоподібного напруги, $ЛЗ$ – лінія затримки, $ЦВП$ – цифровий відліковий пристрій, $Д$ – дешифратор, $ГВІ$ – генератор високочастотних імпульсів, $ЕП$ – елемент порівняння $U_{вим.}$ – вимірювана напруга, K – ключ, $ЛІ$ – лічильник імпульсів, $U_{кер.}$ – керуюча напруга

Рисунок 5.2 – Функціональна схема часоімпульсного вольтметра

Часоімпульсні прилади мають порівняно великі похибки, що пояснюється наявністю похибки дискретності через розбіжність появи рахункових імпульсів з початком і кінцем часового інтервалу, а також за рахунок нелінійного коефіцієнта перетворення. Їхнє застосування вимагає використання спеціальних фільтрів для придушення перешкод.

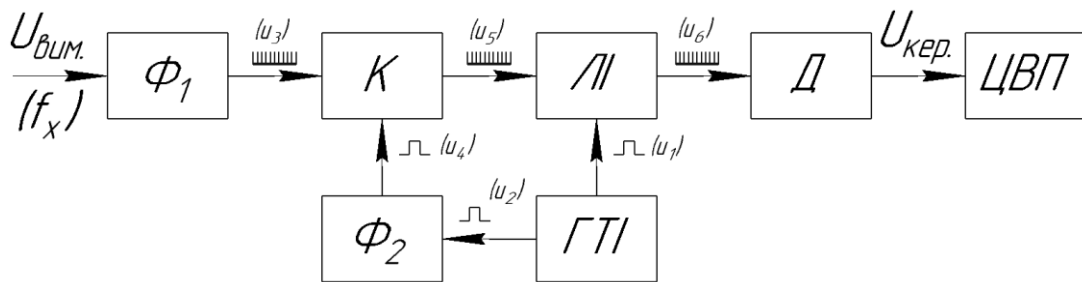
Електронно-лічильні частотоміри

Цифрові частотоміри призначені для вимірювання середнього або миттєвого значення частоти періодичного сигналу, а також для вимірювання абсолютного або відносного відхилення частоти від номінального значення.

Робота електронно-лічильних частотомірів заснована на підрахунку числа імпульсів частотою f_x за інтервал часу T_0 (рис. 5.3).

На часових діаграмах (рис. 5.4) показано напруги на вході ($U_{вим.}$) і на виході окремих елементів схеми (u_3 , u_4 , u_5).

Генератор тактових імпульсів ($ГТІ$) здійснює запуск приладу, виробляючи імпульсні напруги u_1 і u_2 . Імпульс u_1 переводить лічильник $ЛІ$ у початковий стан, імпульс u_2 впливає на формувач Φ_2 , який виробляє нормований імпульс u_4 з тривалістю T_0 . Імпульс u_4 подається на ключ K і відкриває його на час T_0 .



Φ_1 , Φ_2 – формувачі, ГТИ – генератор тактових імпульсів, K – ключ, ЦВП – цифровий відліковий пристрій, ЛИ – лічильник імпульсів, f_x – вимірювана частота, Д – дешифратор

Рисунок 5.3 – Функціонально-структурна схема електронно-лічильного частотоміра

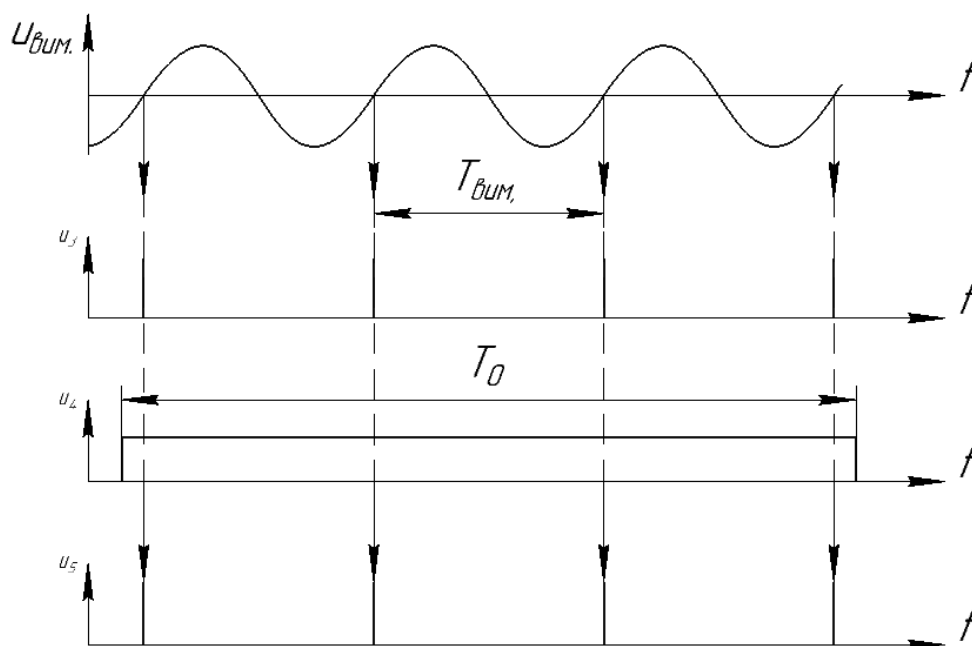


Рисунок 5.4 – Часові діаграми роботи електронно-лічильного пристрою

Періодична напруга $U_{вум.}$, частота ($f_{вх.}$) якої вимірюється, подається на формувач Φ_1 , який формує імпульсну напругу u_3 , що подається на ключ K . Формувач Φ_1 виробляє один імпульс на початку кожного періоду вхідної напруги, імпульси u_3 «проходять» через ключ K до тих пір, поки існує імпульс u_4 . На лічильник імпульсів ЛИ подається серія імпульсів u_5 , число яких (N) залежить від тривалості імпульсу u_4 , який дорівнює T_0 і періоду вхідної напруги ($T_{вум.}$):

$$N = \frac{T_0}{T_{вх.}} = f_{вх.} T_0, \quad (5.4)$$

де $f_{вх.} = 1/T_{вх.}$ – частота вхідної напруги.

Напруга u_5 , що містить N імпульсів полічених $Л$, подається на дешифратор $Д$, який перетворює його в керуючу напругу $U_{кер}$, яка впливає на цифровий відліковий пристрій $ЦВП$, який відображає результат вимірювання у цифровій формі.

При $T_0 = 1$ с число N дає безпосереднє значення вимірюваної частоти. На практиці можна задавати будь-які значення часу T_0 , що дає можливість вимірювати кратні або не кратні значення f_x .

При вимірюванні низьких частот похибка вимірювань зростає і обмежує точність вимірювань. Для підвищення точності можна задавати великі значення T_0 , що суттєво збільшує час вимірювання.

Мультиметри

Термін «мультиметр» зазвичай використовується для найменування універсальних цифрових вимірювальних приладів. Часто такі прилади мають у своєму складі вбудовані мікропроцесори.

Цифрові мультиметри застосовуються для вимірювання постійних і змінних струмів, постійних і змінних напруг, опорів, частоти електричних коливань, ємності конденсаторів і т.п.

Мікропроцесори в ЦВП виконують широке коло функцій:

- управління процесом аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворення,
- управління роботою перетворювачів різних фізичних величин в електричні з подальшим їх вимірюванням,
- автоматичний вибір меж вимірювання,
- управління інтерфейсом користувача,
- управління відліковими пристроями,
- статистична обробка отриманих результатів,
- автоматична корекція систематичних похибок та автокалібрування,
- діагностика несправностей.

Мікропроцесори, що містяться у приладах, підвищує надійність, покращує їх метрологічні і експлуатаційні характеристики але, разом з тим, і підвищує вартість цифрових приладів, що може стати на заваді широкому застосуванню ЦВП на заміну аналогових вимірювальних приладів.

Висновки: Цифровими вимірювальні прилади здатні автоматично перетворювати безперервні аналогові сигнали у цифрові, що є більш зручними для передачі та обробки сучасними мікропроцесорними пристроями. ЦВП є універсальними і дозволяють вимірювати широке коло величин одним приладом. Провісники ЦВП – електромеханічні цифрові прилади – поступаються місцем сучасним електронним цифровим приладам. Сучасні цифрові прилади наблизились до нормованих норм за швидкодією з дотриманням заданих, високих вимог точності.

Зміст звіту

У звіті навести:

- загальні відомості про цифрові вимірювальні прилади та навести їх умовну класифікацію,
- навести та схарактеризувати роботу електромеханічних (контактних) цифрових приладів,
- навести та схарактеризувати роботу часоімпульсних вольтметрів,
- навести та схарактеризувати роботу електронно-лічильних частотомірів,
- визначити функції, що виконують мікропроцесори у ЦВП,
- письмово відповісти на контрольні питання та виконати поставлені завдання.

Контрольні питання

1. Що відбувається із аналоговим сигналом у цифрових вимірювальних приладах?
2. Які вузли є обов'язковими у цифрових вимірювальних приладах? Яке їхнє функціональне призначення?
3. Порівняйте конструктивні відмінності між електромеханічними та електронними ЦВП.
4. Яким є функціональне призначення крокового двигуна та електромеханічного реле у електромеханічних ЦВП?
5. Визначити недоліки часоімпульсних вольтметрів.
6. Визначити призначення цифрового відлікового пристрою у ЦВП.
7. Зазначте область застосування цифрових мультиметрів.

Література: [6, 10, 12, 13].

Практична робота №6

ОГЛЯД СХЕМ ВИМІРЮВАННЯ СТРУМІВ І НАПРУГ У ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛАНЦЮГАХ

Мета заняття: Вивчити схеми вимірювання струмів і напруг у електричних ланцюгах.

Загальні відомості

Електричний ланцюг – це сукупність елементів і пристроїв, по яким протікає електричний струм.

У електричних ланцюгах можливо виробництво електричної енергії, її розподіл і перетворення в інші види енергії.

Усі процеси у електричних ланцюгах описують термінами: сила струму, напруга або електрорушійна сила (ЕРС) і опір (повний, активний, реактивний).

Пристрої (елементи), що входять до складу електричних ланцюгів, з'єднуються між собою провідниками або лініями передач.

Електричний опір (R) характеризує протидію провідного середовища упорядкованому руху електричних зарядів – струму.

Резистор – елемент електричного ланцюга, який характеризується параметром «електричний опір».

Схема електричного ланцюга є графічним зображенням з'єднання елементів електричного кола у відповідній послідовності за допомогою умовних позначок.

Елементами схем електричних ланцюгів постійного струму є резистори, конденсатори, котушки індуктивності, діоди та інші елементи.

Електричні ланцюги прийнято класифікувати за наступними ознаками:

- за видом струму: ланцюги постійного та змінного струму,
- за характером параметрів елементів: лінійні і нелінійні ланцюги,
- за складністю: прості та складні.
- за наявністю джерела електричної енергії: активні та пасивні.

Вимірювання сили струму і напруги

Прилади ділять на аналогові (зі стрілочними індикаторами) і цифрові (з цифровими індикаторами).

Стрілочні індикатори дозволяють одноразово стежити за кількома величинами та забезпечують високу точність вимірювань, а цифрові індикатори дозволяють простіше зчитувати показання.

Універсальні прилади дозволяють здійснювати вимірювання і в ланцюгах постійного і в ланцюгах змінного струму. Комбіновані прилади (мультиметри) призначені для вимірювання різних електричних величин.

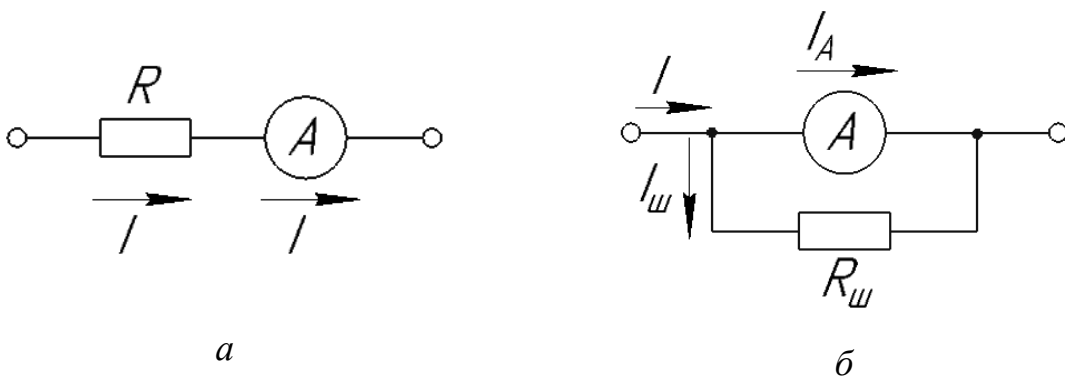
Залежно від виду струму та напруги, його величини, частоти, форми, необхідної точності вимірювання, опорів у ланцюзі використовуються прилади різних типів і систем.

При включенні електровимірювальних приладів у електричний ланцюг, вимірювана величина змінюється. Це викликано наявністю опорів визначеної величини для конкретного типу приладу. Похибку, що виникає у результаті включення вимірювальних приладів у досліджуваний ланцюг та обумовлену спожитою приладом потужністю, називають методичною похибкою.

Вимірювання струму

Вимірювання сили струму здійснюють за допомогою приладів, які називаються **амперметрами**. В основі роботи стрілочних амперметрів полягає залежність кута повороту стрілки індикатора від величини сили струму, що протікає через вимірювальний вузол приладу. Шкали амперметрів зазвичай градуюють безпосередньо в одиницях сили струму: амперах (А), міліамперах (mA) або мікроамперах (μA).

При вимірюванні сили струму на ділянці ланцюга опором R **амперметри включають послідовно в розрив ланцюга** (рис. 6.1a). У даному випадку сила струму, що протікає через вимірювальний прилад і ділянку з опором R , буде однаковою.



a – у розрив ділянки ланцюга, *б* – розширення меж вимірювання амперметра з використанням шунта

Рисунок 6.1 – Підключення амперметра

Послідовне підключення амперметра з опором r_A у ділянку з опором R збільшує загальний опір ділянки ланцюга до величини $(R + r_A)$, що призводить до зменшення струму, що вимірюється. Для того, щоб ця зміна була незначною, необхідним є виконання умови:

$$r_A \ll R, \quad (6.1)$$

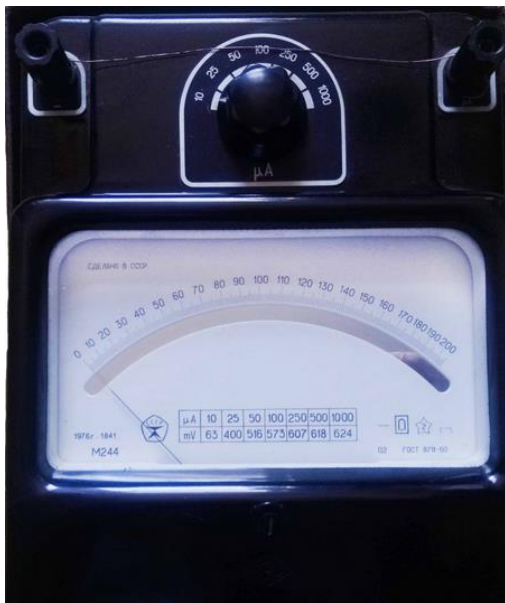
Фактично, при використанні шунта амперметр виконує функції вольтметра, шкала якого проградуйована у значеннях сили струму (А, mA, μA).

Струм, що викликає відхилення рухомої частини приладу на всю шкалу, називається струмом повного відхилення. Якщо за допомогою амперметра необхідно виміряти силу струму більший за струм повного відхилення вимірювального приладу, до нього паралельно підключається додатковий опір $R_{ш}$, який називають шунтом (рис. 6.1 б). У даному випадку вимірюваний струм розгалужується і через вимірювальний прилад проходить тільки його частина, що дозволяє розширити межі вимірювань амперметра. Величину опору шунта можна визначити за співвідношенням:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}, \quad (6.2)$$

де n – коефіцієнт шунтування (збільшення меж вимірювання).

У середині корпусу багатограничних амперметрів розміщують кілька різних шунтів. На лицьовій панелі вказують максимальні значення сили струму, які можуть бути виміряні при обраному положенні перемикача меж вимірювань. Часто багатограничні прилади мають кілька шкал, які відповідають певної межі вимірювань. Якщо у приладу одна шкала, ціна поділу шкали буде різною для кожної з меж вимірювання (рис. 6.2 а).



а



б

а – багатограничний лабораторний прилад (мікроамперметр/мільовольтметр), б – стрілочний комбінований аналоговий прилад тестер-мультиметр

Рисунок 6.2 – Аналогові стрілочні прилади

Шунти виготовляються на падіння напруги 45, 75, 100, 150 мВ при номінальних для них значень струмів.

Застосування шунтів з приладами електромагнітної, електродинамічної, феродинамічної системи нераціонально, через значне власне споживання потужності, а шунти будуть досить громіздкими і коштовними. При включенні шунтів у ланцюгах змінного струму виникає додаткова похибка вимірювань, яка обумовлена залежністю опорів шунтів від частоти.

Технологія вимірювань за допомогою амперметра, як приладу підвищеної небезпеки при роботі повинна бути чітко визначена. При вимірюванні постійних струмів універсальними та комбінованими приладами перемикач роду струму необхідно встановити у положення, що відповідає роботі в режимі «постійний струм» («—»). При цьому відлік показань здійснюється за тією шкалою, навпроти якої вказані символи «—» і «А» («mA», «μA»).

Для уникнення виходу з ладу приладу необхідно стежити за полярністю його підключення до ланцюга. Вхідні клеми приладу, що позначаються спеціальними символами «*», «—», «заг.», «com» і т.п. необхідно підключати до тієї точки розриву ланцюга, що має менший потенціал по відношенню до іншої точки, яку, в свою чергу, підключать до вхідної клеми, що позначається символами «+» або «А» («mA», «μA») (рис. 6.2 б).

Через амперметр, що підключено послідовно, протікає весь струм, тому вимірювання струму бажано проводити при його відомому очікуваному значенні. У разі невідомості граничних значень струму, вимірювання слід починати з використанням максимальної межі, вимірюваної приладом. У разі відхилення стрілки на малий кут, необхідно перейти на меншу межу вимірювань, попередньо відключивши прилад від ланцюга.

Через низьке значення опору амперметра, його **ЗАБОРОНЕНО!** включати у ланцюг паралельно елементу з великим опором або безпосередньо до джерела живлення, що може вивести прилад з ладу.

Приклад 6.1. Розрахувати шунт до амперметра з межею вимірювання струму $I_{AH} = 5$ А для вимірювання постійного струму $I = 50$ А і визначити ціну його поділок до і після приєднання шунта. Шкала амперметра має $N_H = 100$ поділок, а його внутрішній опір $R_A = 0,015$ Ом.

Розв'язання. У двох паралельних гілках струми розгалужуються обернено пропорційно опорів цих гілок:

$$\frac{I_{AH}}{I_{ш}} = \frac{R_{ш}}{R_A}, \text{ звідки } R_{ш} = \frac{I_{AH}}{I_{ш}} \cdot R_A$$

де $I_{ш}$ – струм у шунті, А:

$$I_{ш} = I - I_{AH} = 50 - 5 = 45 \text{ А}$$

$$R_w = \frac{5}{45} \cdot 0,015 = 0,00167 \text{ Ом}$$

Обираємо з визначеного вище ряду шунтів такий, на якому падіння напруги складає: $R_A \cdot I_{AH} = 0,015 \cdot 5 = 0,075 \text{ В} = 75 \text{ мВ}$.

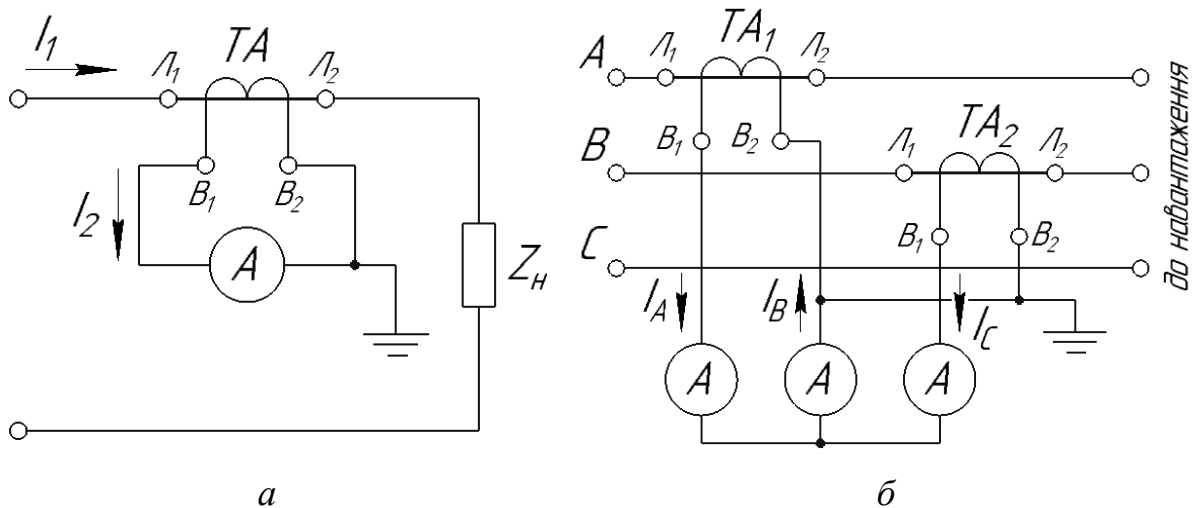
Ціна поділки шкали амперметра до приєднання шунта:

$$C_A = \frac{I_{AH}}{N_H} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ А/поділку.}$$

Ціна поділки шкали амперметра після приєднання шунта:

$$C_A' = \frac{I}{N_H} = \frac{50}{100} = 0,5 \text{ А/поділку.}$$

Для розширення меж вимірювання приладів можна скористатися трансформаторами струму ТА, які перетворюють великі струми у струми, зручні для вимірювання існуючими приладами. Обмотку трансформатора струму включають послідовно в ланцюг вимірюваного струму, а у вторинну обмотку включають амперметр з малим опором (не більше 2 Ом). Вторинну обмотку трансформатора струму обов'язково заземлюють.



а – в однофазній мережі, б – у трифазній мережі

Рисунок 6.3 – Схеми включення амперметрів за допомогою вимірювальних трансформаторів струму

Вимірювальний трансформатор струму вибирають в залежності від умов роботи і значення вимірюваного струму. При використанні вимірювальних трансформаторів струму необхідно стежити за тим, щоб вторинна обмотка при підключенні первинної не залишалася розімкнутою.

Приклад 6.2. Виміряти змінний струм $I = 90$ А амперметром з межею вимірювання $I_{AH} = 5$ А. Шкала амперметра має $N_H = 100$ поділок.

Розв'язання: щоб амперметром, що має межу вимірювання 5 А, виміряти змінний струм $I = 90$ А, необхідно підключити його до обмотки трансформатора струму, розрахований на номінальний первинний струм 100 А, з коефіцієнтом трансформації:

$$k = \frac{100}{5} = 20.$$

Ціна поділки амперметра після підключення трансформатора струму становитиме:

$$C'_A = k \cdot C_A$$

де C_A – ціна поділки шкали амперметра до підключення трансформатора струму:

$$C_A = \frac{I_{AH}}{N_H} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ А/поділку}$$

тоді

$$C'_A = 20 \cdot 0,05 = 1 \text{ А/поділку}$$

При струмі $I = 90$ А стрілка амперметра відхилиться на:

$$N = \frac{I}{C'_A} = \frac{90}{1} = 90 \text{ поділок}$$

Досить зручними для вимірювання струмів є вимірювальні кліщі, які відрізняються від вимірювальних трансформаторів струму наявністю роз'ємного магнітопроводу, який дозволяє вимірювати струм у провідниках без їх попереднього розриву.

Принцип дії приладу заснований на явищі електромагнітної індукції. Вони являють собою легкороз'ємний сталевий сердечник у формі кліщів (рис. 6.4), яким охоплюють струмоведучий провідник 1. Магнітопровід 2 забезпечує передачу частини магнітного потоку, який виникає навколо дроту від протікаючого через нього струму, до вимірювальної обмотки 3. У цілому, прилад можна розглядати як вимірювальний трансформатор, первинна обмотка якого утворена провідником з протікаючим змінним струмом. До виводів вимірювальної обмотки підключений вимірювач діючого значення змінного струму 4, шкала якого градуйована з урахуванням величини коефіцієнта трансформації $k_i = I/I_0$ (I – діюче значення струму, що протікає у провіднику, I_0 – діюче значення струму, що протікає в ланцюзі вимірювальної обмотки).

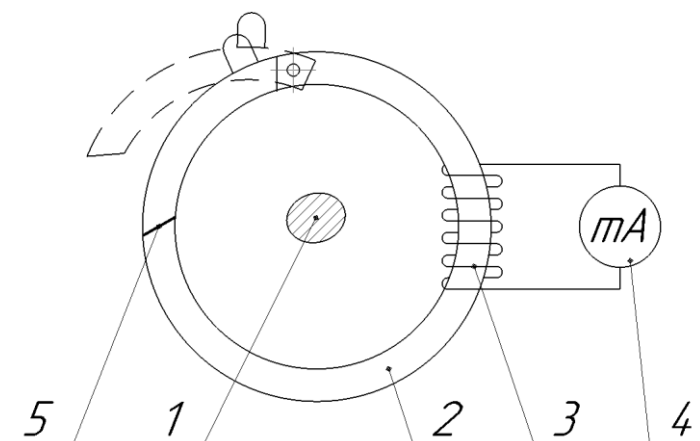


Рисунок 6.4 – Схематичне зображення струмовимірювальних кліщів (позначення у тексті)

Вимірювальні кліщі включають у ланцюг тільки під час вимірювання. Недолік приладу – відносно висока похибка вимірювань, обумовлена нестабільністю магнітного потоку в осерді через зміни характеристик зазору 5 при змиканні кліщів, випадкового просторового положення провідника з проводом відносно магнітопроводу й іншими.

Вимірювання напруги

Вимірювання напруги (різниці потенціалів) на ділянці ланцюга здійснюють за допомогою **вольтметрів**, що підключаються паралельно досліджуваній ділянці (рис. 6.3 а).

Конструктивно, аналоговий вольтметр (крім деяких систем) являє собою амперметр, послідовно з яким встановлено додатковий резистор з досить великим опором.

Шкалу вольтметра градуюють в одиницях напруги – вольтах (В), мілівольтах (мВ), мікровольтах (μВ), кіловольтах (кВ).

Внутрішній опір вольтметра r_B повинен бути якомога більшим ніж опір R тієї ділянки ланцюга, на якій проводять вимірювання, у іншому випадку це може призвести до помітної зміни вимірюваної напруги.

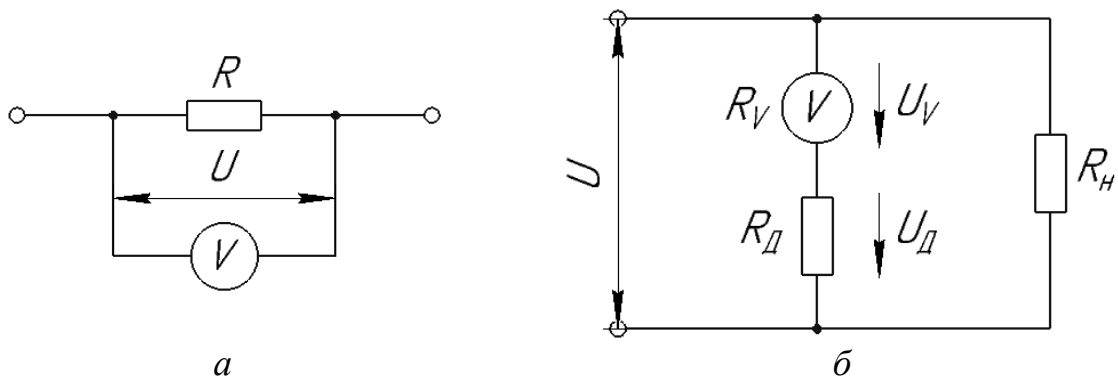
Для розширення меж вимірювання вольтметра послідовно з ним включають додатковий опір R_D (рис. 6.3 б), величину якого можна визначити за залежністю:

$$R_D = R_B(n-1), \quad (6.3)$$

де R_B – опір вольтметра, В,

n – коефіцієнт збільшення меж вимірювань.

Для розширення меж вимірювань у багатограничних вимірювань, всередині їх корпусу встановлено кілька додаткових опорів, які можна змінити за допомогою перемикача. Максимальні значення напруги для кожної межі вказують на лицьових панелях поруч з перемикачем (рис. 6.2а).



a – паралельно ділянці ланцюга, *б* – розширення меж вимірювання вольтметра з використанням додаткового опору

Рисунок 6.3 – Підключення вольтметра

У разі використання комбінованих багатограничних приладів перемикач роду струму повинен бути встановлений у положення, що відповідає вимірюванню напруги в ланцюзі постійного струму. Його можна визначити за символами «—», «+U», «-U» або «V». Відлік показань здійснюється за шкалами, поруч з якими вказано символи «—» і «V». Ціна поділок визначається для кожної межі вимірювань або для кожної відповідної шкали (рис. 6.2 б).

При виконанні вимірювань напруги в ланцюгах постійного струму слід, так само як і при вимірах сили струму, дотримуватись полярності підключення приладу до ланцюга. Для зручності корисно користуватися кольоровими дротами: червоні дроти підключають до «+» джерела живлення і клем приладу, а сині – до відповідних клем з позначкою «—».

Для досягнення більшої точності вимірювань напруги краще скористатися цифровими вольтметрами, внутрішній опір яких значно перевищує внутрішній опір аналогових вольтметрів.

Перед початком вимірювань необхідно перевіряти правильність установки нульового значення за шкалою або цифровим індикатором, при цьому вхідні клеми приладу необхідно замкнути.

Приклад 6.3. Яким чином здійснити вимірювання вольтметром з межею вимірювання $U_{VN} = 150$ В напругу постійного струму $U = 250$ В, якщо внутрішній опір вольтметра складає $R_V = 7500$ Ом.

Розв'язання: щоб розширити межі вимірювання вольтметра при постійному струмі, необхідно підключити до нього послідовно додатковий опір R_D .

Падіння напруги на цьому додатковому опорі повинна складати:

$$U_D = U - U_{VN} = 250 - 150 = 100 \text{ В,}$$

Відомо, що падіння напруги на ділянці послідовного ланцюга є пропорційним опорів цієї ділянки, що виходить з рівності:

$$I_V = \frac{U_D}{R_D} = \frac{U_{VH}}{R_V}$$

звідки

$$\frac{U_D}{U_{VH}} = \frac{R_D}{R_V}$$

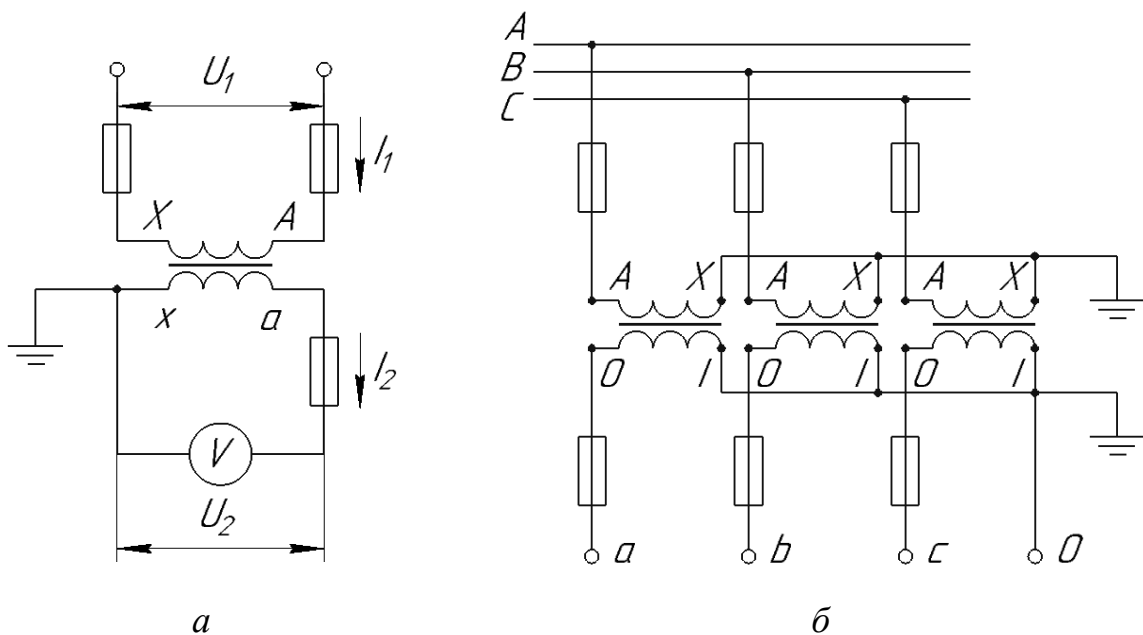
остаточно

$$R_D = \frac{U_D}{U_{VH}} \cdot R_V = \frac{100}{150} \cdot 7500 = 5000 \text{ Ом}$$

Для розширення меж вимірювання вольтметрів можна скористатися трансформаторами напруги, які перетворюють великі напруги у напруги, зручні для вимірювання даним приладом.

Вимірювальний трансформатор напруги за конструктивним виконанням і принципом дії не відрізняється від силового понижуючого трансформатора: складається зі сталевого осердя, набраного з пластин листової електротехнічної сталі, первинної обмотки і однієї або двох вторинних обмоток.

На рис. 6.3 а показано схему приєднання трансформатора напруги з однією вторинною обмоткою. На первинну обмотку подається висока напруга U_1 , а до вторинної обмотки з напругою U_2 підключений вимірювальний прилад. Початки первинної і вторинної обмоток позначені буквами А і а, кінці – Х і х. Такі позначення зазвичай наносяться на корпусі трансформатора напруги поруч із затискачами його обмоток.



а – приєднання однофазного вимірювального трансформатора напруги,
б – схема з'єднання трьох однофазних трансформаторів напруги в зірку

Рисунок 6.3 – Схеми підключення вимірювальних трансформаторів

Відношення номінальної напруги на первинній обмотці до номінальної напруги на вторинній обмотці називають номінальним коефіцієнтом трансформації трансформатора напруги:

$$k_n = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} \quad (6.4)$$

На рис. 6.3 б наведено схему з'єднання трьох однофазних трансформаторів напруги в зірку. Дана схема дозволяє вимірювати фазні і міжфазні напруги у трифазних ланцюгах.

Заземлення вторинних обмоток є обов'язковим незалежно від схем їхнього з'єднання. Зазвичай заземлюється один з фазних провідників або нульова точка при з'єднанні у «зірку». Це заземлення є захисним і забезпечує безпеку обслуговуючого персоналу при попаданні високої напруги у вторинні обмотки.

Первинні обмотки до 35 кВ підключаються до мереж через високовольні запобіжники для швидкого відключення від мережі пошкодженого трансформатора напруги. Для захисту обмоток трансформаторів напруги при пошкодженнях у вторинних обмотках встановлюються автоматичні вимикачі або запобіжники низької напруги.

Приклад 6.4. У однофазному ланцюзі змінного струму необхідно виміряти напругу $U = 6000$ В вольтметром з межею вимірювання $U_{VH} = 150$ В і з числом поділок шкали $N_H = 50$.

Розв'язання. Для розширення меж вимірювання вольтметра при змінному струмі, необхідно включити його через вимірювальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації:

$$k = \frac{6000}{150} = 40$$

Ціна поділки вольтметра без трансформатора напруги складає:

$$C_V = \frac{U_{VH}}{N_H} = \frac{150}{50} = 3 \text{ В/поділку.}$$

Ціна поділки вольтметра з трансформатором напруги складе:

$$C'_V = k \cdot C_V = 40 \cdot 3 = 120 \text{ В/поділку.}$$

При напрузі $U = 5000$ В стрілка вольтметра відхилиться на:

$$N = \frac{U}{C'_V} = \frac{5000}{120} = 41.67 \text{ поділок,}$$

що відповідає:

$$U'_V = N \cdot C_V = 50 \cdot 3 = 150 \text{ В.}$$

Значення 150 В за показаннями вольтметра з використанням трансформатора напруги відповідає істинному значенню вимірюваної напруги.

Висновки: Вимірювання основних показників роботи електричних ланцюгів – струму і напруги – повинно здійснюватися з суворим дотриманням схем підключення та меж вимірювання електровимірювальних приладів. Межі вимірювання приладів можуть бути розширені шляхом застосування додаткових пристроїв – шунтів, додаткових опорів, трансформаторів струму і напруги.

Зміст звіту

У звіті навести:

- зазначити класифікацію електричних ланцюгів,
- навести та проаналізувати схеми вимірювання струму у електричних ланцюгах,
- навести та проаналізувати схеми вимірювання напруги у електричних ланцюгах,
- визначити додаткові вимоги до правил застосування амперметрів і вольтметрів,
- письмово відповісти на контрольні питання та виконати поставлені завдання.

Контрольні питання

1. Що характеризує електричний опір (R) у електричному ланцюзі?
2. Яким чином включається амперметр у ділянку ланцюга для вимірювання сили струму? Яким чином можна розширити межі вимірювання заданим амперметром?
3. Визначити принцип застосування струмовимірювальних кліщів.
4. Яким чином включається вольтметр у ділянку ланцюга для вимірювання напруги? Яким чином можна розширити межі вимірювання заданим вольтметром?

Література: [9, 11, 12, 13, 14].

Практична робота №7

ОГЛЯД СХЕМ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ У ЛАНЦЮГАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета заняття: Вивчити схеми вимірювання потужності у ланцюгах змінного струму.

Загальні відомості

Вимірювання потужності в ланцюгах змінного струму можна здійснювати опосередковано з використанням вольтметра (напруга – U), амперметра (струм – I) і фазометра (кут між напругою та струмом – φ), включених у ланцюг відповідним чином, зв'язок між якими можна визначити наступною залежністю:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (7.1)$$

У практичних цілях даний спосіб є не досить зручним. Тому, для вимірювання активної і реактивної потужності у зазначених ланцюгах у більшості випадків користуються ватметрами, в основу роботи яких покладено електродинамічні (у ланцюгах постійного і змінного струму з частотою до тисяч герц) та феродинамічні (у ланцюгах змінного струму з промисловою частотою) системи, шкали яких є рівномірними. Шкали однодіапазонних ватметрів проградуйовані у значеннях вимірюваної величини (Вт, кВт), шкали багатодіапазонних ватметрів неградуйовані і вимагають попереднього визначення величини поділки. У промисловості також широко використовують цифрові ватметри (рис. 7.1).



Рисунок 7.1 – Приклади лабораторного і промислового ватметрів

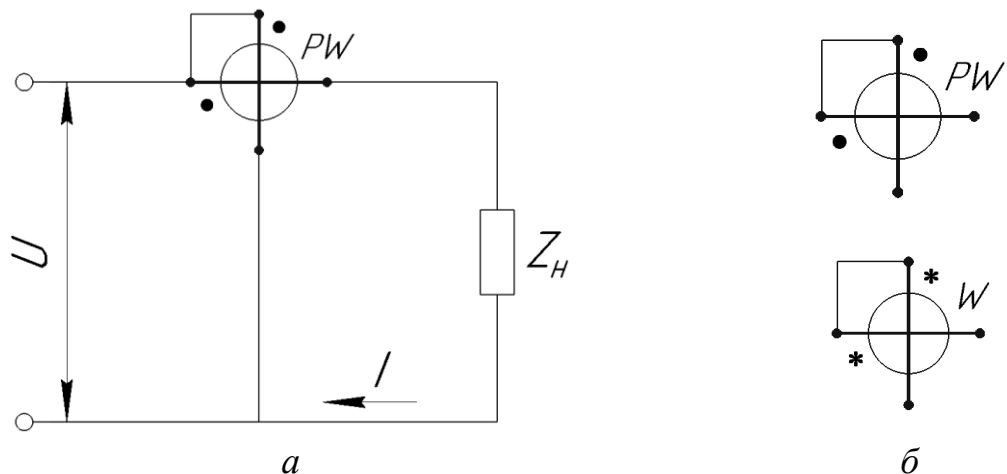
Вимірювання активної потужності

Вимірювання активної потужності у трифазних ланцюгах в лабораторних умовах можна здійснювати з використанням одноелементних ватметрів, застосовуючи при цьому один з методів: одного, двох або трьох ватметрів. При технічних вимірюваннях при цьому, як правило, використовують спеціальні дво- і триелементні ватметри.

Розширення діапазонів вимірювання у всіх випадках застосування ватметрів у ланцюгах змінного струму здійснюється за допомогою вимірювальних трансформаторів напруги і струму.

Метод одного ватметра

Даний метод застосовується при вимірюванні потужності в однофазних ланцюгах і симетричних трифазних ланцюгах з використанням одноелементного ватметра. Обмотка напруги ватметра включається на фазну напругу, а обмотка струму включається в «розрив» будь-якої фази (рис. 7.2). Нехтуючи методичної похибкою, показання ватметра можна визначити за залежністю (7.1).



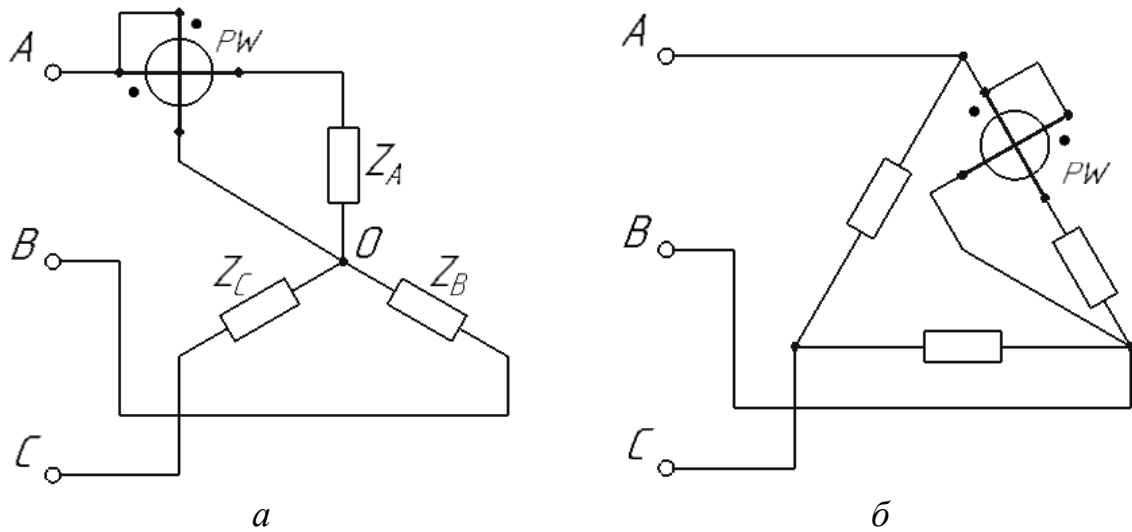
а — схема вимірювання з використанням одноелементного ватметра, б — позначення ватметрів («•», «*» — позначки, що визначають положення «генераторних» затискачів обмоток, на які рекомендується підключати сторону джерела живлення — це дозволяє зменшити значення методичної похибки)

Рисунок 7.2 — Схема включення ватметра в однофазний ланцюг змінного струму

У разі, коли трифазний ланцюг має нульовий провід або маємо доступ до «нульової точки», вимірювання потужності (в одній фазі) здійснюється за схемою, представленою на рис. 7.3.

Для вимірювання потужності трифазного ланцюга одноелементним (однофазним) ватметром у разі недоступності до «нульової точки», необхідно створити штучну «нульову точку» за допомогою активних опорів, розрахованих на номінальний струм паралельного ланцюга

ватметра (значення активних опорів вибираються дорівнюючими опору ланцюга обмотки напруги ватметра) – приклад даної схеми наведено на рис. 7.4.



a – навантаження з'єднані зіркою, *б* – навантаження з'єднані трикутником

Рисунок 7.3 – Схеми включення ватметра у трифазний трипровідний ланцюг при симетричному навантаженні

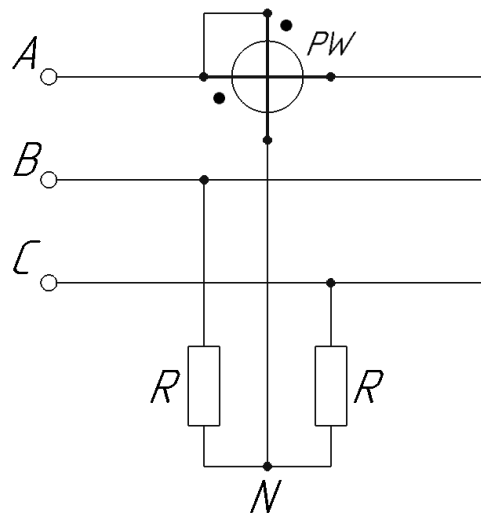


Рисунок 7.4 – Схеми включення ватметра в трифазний трипровідний ланцюг при симетричному навантаженні у разі недоступності нульової точки

Потужність трифазного ланцюга визначають за формулою:

$$P = 3 \cdot P_W \quad (7.2)$$

де P_W – показання одного ватметра, Вт.

Метод двох ватметрів

Даний метод застосовується для вимірювання активної потужності при рівномірному і нерівномірному навантаженні у трифазних трипровідних ланцюгах і не залежить від способу з'єднання електроприймачів. Для вимірювань можна застосувати або два одноелементних або один двоелементний ватметр (рис. 7.5).

Двоелементний ватметр іноді називають трифазними ватметрами і являють собою конструкцію з двох вимірювальних механізмів одноелементних феродинамічних ватметрів з однією спільною рухомою частиною.

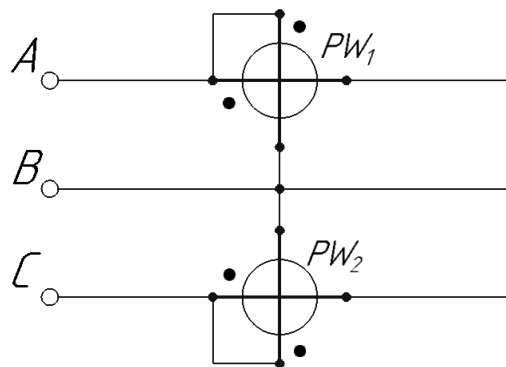


Рисунок 7.5 – Схеми включення двох одноелементних ватметрів для вимірювання активної потужності у трифазному ланцюзі

Загальна вимірювана потужність трифазного ланцюга визначається в цьому випадку як алгебраїчна сума показань обох ватметрів:

$$P = P_{W1} + P_{W2} \quad (7.3)$$

При застосуванні даного методу можна спостерігати окремі випадки:

- один з приладів має нульові показання, що відбувається при наявності у ланцюзі активно-індуктивного навантаження. Кут зсуву фаз між струмом і напругою у цьому разі дорівнює $\varphi = 60^\circ$ ($\cos \varphi = 0,5$) – активна потужність трифазного ланцюга визначається показаннями лише одного ватметра,

- обидва прилади визначають однакові показання, що буває при чисто-активному навантаженні, у цьому разі $\varphi = 0^\circ$ ($\cos \varphi = 1$),

- один з приладів має негативні показання, що буває при активно-індуктивному навантаженні. Кут зсуву фаз між струмом і напругою $\varphi > 60^\circ$ ($\cos \varphi < 0,5$). У цьому випадку необхідно переключити затискачі однієї з обмоток ватметра, а активна потужність трифазного ланцюга буде визначатися різницею показань ватметрів:

$$P = P_{W2} - P_{W1} \quad (7.4)$$

Метод трьох ватметрів

Даний метод застосовується для вимірювання активної потужності в трифазних ланцюгах з нейтральним проводом при нерівномірному навантаженні фаз. У якості вимірювальних приладів можуть бути використані три одноелементних або один триелементний ватметр. Одноелементні ватметри підключаються за схемою, представленою на рис. 7.6, при цьому кожен з ватметрів вимірює потужність однієї з фаз.

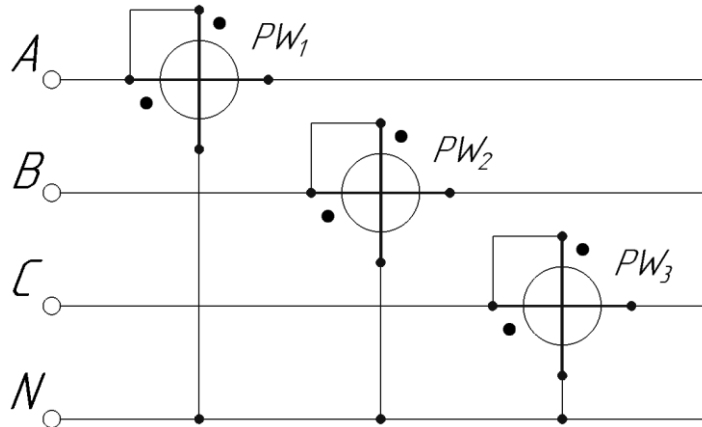


Рисунок 7.6 – Схеми включення трьох одноелементних ватметрів для вимірювання активної потужності у трифазному ланцюзі

Активна потужність трифазного ланцюга визначається сумою показань усіх ватметрів:

$$P = P_{W_1} + P_{W_2} + P_{W_3} \quad (7.5)$$

Вимірювання реактивної потужності

Наявність реактивної потужності призводить до додаткових втрат в лініях електропередач та погіршенні експлуатаційних характеристик енергетичних систем. Вимірювання реактивної потужності (Q, вимірюється в вольт-амперах реактивних – «вар» або «ВАр») в трифазних ланцюгах може бути здійснено за допомогою звичайних однофазних ватметрів, включених в трифазні ланцюги за особливими схемами.

Способи вимірювання реактивної потужності у трифазних колах подібні до способів вимірювання активної потужності. Особливість схем вимірювання реактивної потужності полягає в тому, що паралельна обмотка кожного одноелементного ватметра підключається з урахуванням колового чергування фаз до тих лінійних провідників, у розрив яких не включена його послідовна (струмова) обмотка. При цьому кут між вектором струму послідовної обмотки і вектором напруги паралельної обмотки ватметра стає дорівнюючим ($90^\circ - \varphi$), а показання ватметра будуть пропорційними реактивній потужності фази. Дані схеми включення називають схемами із заміщеними напругами. Але при такому способі

вимірювання є одна вимога: система напруг у ланцюзі повинна бути симетричною.

Реактивна потужність трифазного ланцюга визначається сумою реактивних потужностей окремих фаз:

$$Q = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C \quad (7.6)$$

У разі повної симетрії у ланцюзі маємо залежність:

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} U_\ell I_\ell \sin \varphi \quad (7.7)$$

де U_ϕ , U_ℓ – фазна і лінійна напруга, В,
 I_ϕ , I_ℓ – фазний і лінійний струм, А.

Метод одного ватметра

Схема реалізації даного методу при рівномірному навантаженні фаз наведено на рис. 7.7. У даному випадку заміненою напругою по відношенню до фазної напруги U_A буде лінійна напруга U_{BC} .

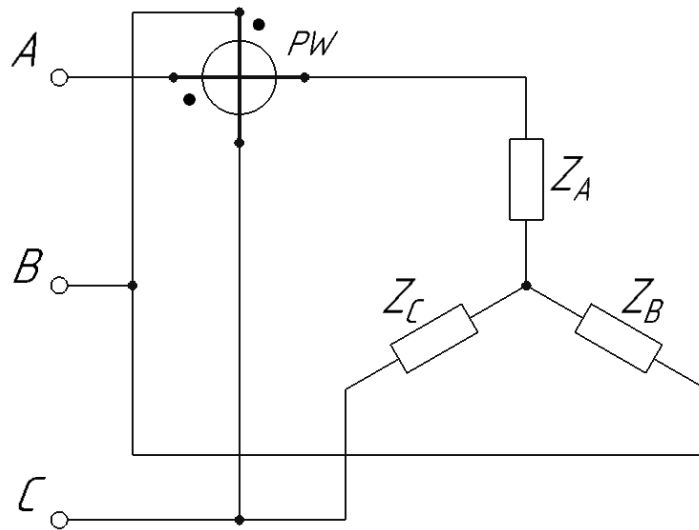


Рисунок 7.7 – Схеми включення одного ватметра для вимірювання реактивної потужності у трифазному ланцюзі

Показання ватметра будуть наступні:

$$P = U_{BC} I_A \cos (90^\circ - \varphi) = U_\ell I_\ell \sin \varphi \quad (7.8)$$

Реактивну потужність у ланцюзі можна розрахувати за залежністю, яку можна вивести з «трикутника потужності»:

$$Q = \sqrt{3} P = \sqrt{3} U_\ell I_\ell \sin \varphi \quad (7.9)$$

Метод двох ватметрів

Даний метод можна застосовувати в трифазних ланцюгах і при рівномірному і при нерівномірному навантаженні (рис. 7.8).

У даній схемі опір резистора (R) повинен дорівнювати опору паралельного ланцюга кожного ватметра.

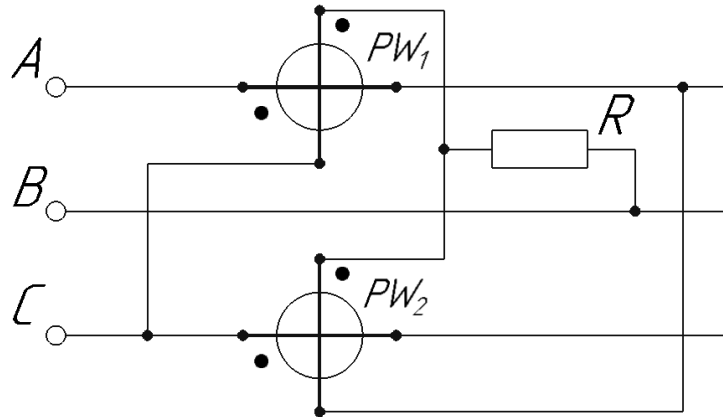


Рисунок 7.8 – Схеми включення двох ватметрів для вимірювання реактивної потужності у трифазному ланцюзі при симетричному і несиметричному навантаженні

Реактивна потужність всього трифазного ланцюга при застосуванні двох ватметрів можна визначити за залежністю:

$$Q = \sqrt{3}(P_{W_1} + P_{W_2}) = \sqrt{3} \cdot (\sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi) = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi \quad (7.10)$$

Метод трьох ватметрів

Метод трьох ватметрів застосовується трифазних мережах при рівномірному і нерівномірному навантаженні фаз (рис. 7.9).

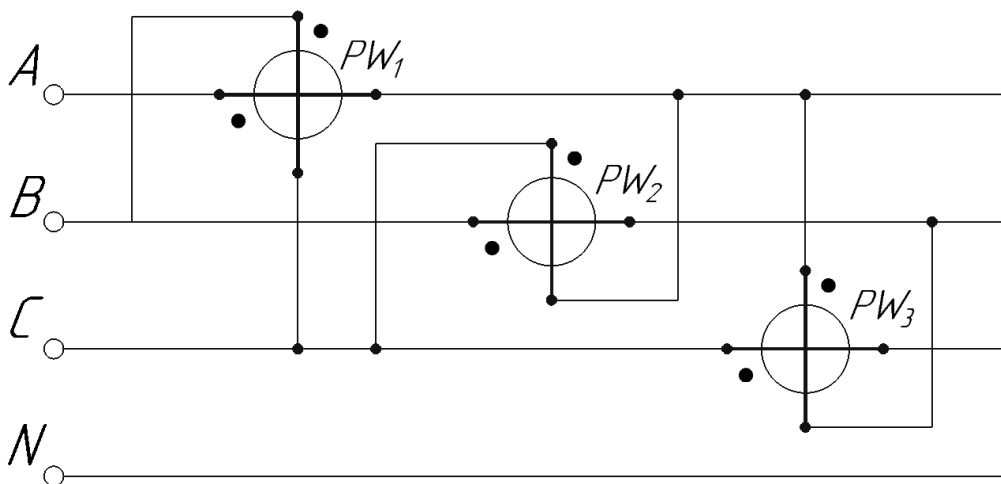


Рисунок 7.9 – Схеми включення трьох ватметрів для вимірювання реактивної потужності у трифазному ланцюзі при симетричному і несиметричному навантаженні

Реактивна потужність всього трифазного ланцюга при застосуванні трьох ватметрів можна визначити за залежністю:

$$Q = (P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}) / \sqrt{3} = (3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi) / \sqrt{3} = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi \quad (7.11)$$

Замість трьох ватметрів можна використовувати один трифазний триелементний ватметр, елементи якого включаються за такою ж схемою, що і на рис. 7.9. На реальних вимірювальних приладах усі математичні операції враховуються при нанесенні градування на шкалу.

Зміст звіту

У звіті навести:

- занотувати спосіб вимірювання потужності в ланцюгах змінного струму опосередкованим методом, визначити недоліки даного способу;
- оглянути та занотувати способи вимірювання активної потужності, накреслити схеми включення ватметрів при різних способах,
- оглянути та занотувати способи вимірювання реактивної потужності, накреслити схеми включення ватметрів при різних способах,
- письмово відповісти на контрольні питання та виконати поставлені завдання.

Контрольні питання

1. За допомогою яких приладів можна опосередковано здійснити вимірювання потужності в ланцюгах змінного струму (без використання ватметрів)? Яким чином необхідно буде розрахувати похибку вимірювань у цьому випадку?
2. У яких ланцюгах можна застосовувати метод вимірювання з використанням одноелементного ватметра?
3. Що означають позначки «•» або «*» на схемах та на затискачах ватметрів? Яким чином ці позначки впливають на підключення ватметрів?
4. З якою метою визначають значення реактивної потужності у ланцюгах змінного струму?
5. У чому полягає особливості вимірювальних схем для вимірювання реактивної потужності у порівнянні зі схемами вимірювання активної потужності?

Література: [11, 12, 13, 14, 15].

Практична робота №8

ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Мета заняття: вивчити наведені способи та технології вимірювання неелектричних величин електровимірювальними приладами.

Основні теоретичні положення

Контроль протікання технологічних процесів та необхідність проведення якісних наукових досліджень досить часто вимагає здійснювати вимірювання неелектричних величин. Кількість контрольованих неелектричних величин значно перевищує кількість електричних величин, що пояснює багате різноманіття електричних приладів для вимірювання неелектричних величин.

Широке використання електричних приладів для вимірювання неелектричних величин можна пояснити більшою доступністю для їх обробки, передачі та реєстрації.

Для реалізації вимірювання неелектричних величин за допомогою електричних приладів, останні містять **вимірювальний перетворювач** неелектричної величини в електричну, який враховує у своїй роботі встановлену заздалегідь функціональну залежність.

Вимірювальні перетворювачі неелектричних величин в електричну можна розділити на параметричні та генераторні.

У параметричних перетворювачах вихідною величиною є зміна (приріст) параметра електричного кола (опір, індуктивність, ємність та інші) і при їх використанні необхідним є використання стороннього джерела живлення.

У генераторних перетворювачах вихідною величиною є електрорушійна сила (ЕРС), величина струму або заряд, значення яких функціонально пов'язаний з величиною вимірюваної неелектричної величини.

Однією з вимог до перетворювачів неелектричних величин є прагнення отримання лінійної функції перетворення. Зворотне обумовлює збільшення значення похибки нелінійності, яка є однією зі складових результуючої похибки при вимірюванні неелектричних величин.

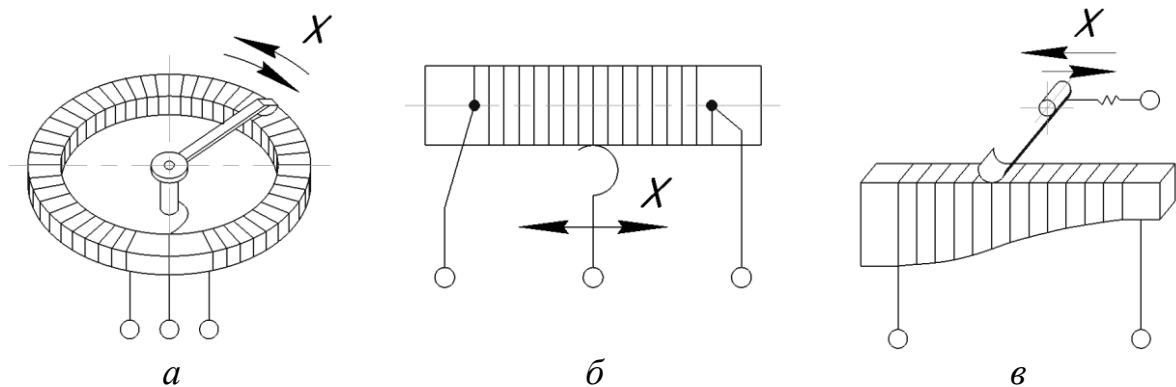
При оцінці якісної сторони перетворювачів необхідно також враховувати вплив на їх роботу зовнішніх факторів – температури, тиску, вібрацій та інші.

Розглянемо принцип дії і основні властивості найбільш поширених вимірювальних перетворювачів.

Резистивні (реостатні) перетворювачі

Резистивні (реостатні) перетворювачі – це параметричні перетворювачі, вихідною величиною яких є величина електричного опору.

Резистивні перетворювачі добре підходять для перетворення переміщення, як вхідної величини. У найпростішому випадку такі перетворювачі являють собою електричний реостат, щітка (двигжок) якого переміщається під впливом вимірюваної неелектричної величини (рис. 8.1).



а – кутових переміщень, *б* – лінійних переміщень, *в* – лінійний функціональний

Рисунок 8.1 – Схеми резистивних (реостатних) перетворювачів

Резистивний перетворювач складається з обмотки, нанесеної на каркас, і щітки. Форма каркаса залежить від характеру вимірюваного переміщення (лінійне або кутове) і від виду функції перетворення (лінійна або нелінійна) та може мати форму циліндра, тора, кільця й інш.

Каркас виготовляється з діелектричних матеріалів (пластмаса, кераміка) та металів з ізоляційним лаковим покриттям. Дріт обмотки виконується з різних сплавів платини, константан, фехраль, манганін через їх підвищену корозійну і зносостійкість.

Резистивні перетворювачі з дрітаною обмоткою є дискретними перетворювачами через те, що безперервній зміні переміщення відповідає дискретна зміна опору. Це викликає виникнення похибки дискретизації, яку можна зменшити шляхом збільшення числа витків обмотки (на практиці до 200 витків), або шляхом застосування реохордних перетворювачів, у яких щітка рухається вздовж осі каліброваного дроту.

Щітки таких перетворювачів виконують або з дроту, або з плоских пружних смужок. Для цього можуть бути використані як чисті метали (платина, срібло), так і сплави (платина з іридію, фосфориста бронза й інш). Якість контакту щітки і обмотки забезпечується тиском у місці контакту, який у залежності від контактуючих матеріалів та умов роботи перетворювача може коливатися у широких межах – від 0,01 до 10 Н.

Для отримання нелінійної функції перетворення застосовують функціональні резистивні перетворювачі (рис. 8.1 *в*).

Перевага реостатних вимірювальних перетворювачів міститься у великій вихідній потужності, а недолік – у наявності контактного тертя.

У якості вихідного параметра резистивних перетворювачів виступає опір, який зазвичай вимірюється за допомогою мостової схеми, що самоврівноважуються, або з логометром у вимірювальній діагоналі. Такі схеми дозволяють уникати впливу коливань напруги джерела живлення і перехідного контакту у місці дотикання.

За допомогою резистивних вимірювальних перетворювачів можна крім прямих вимірювань кутових і лінійних переміщень, вимірювати ті величини, які, в свою чергу, можуть бути перетворені у ці переміщення (тиск, рівень та об'єм рідини й інші).

Тензочутливі перетворювачі (тензорезистори)

Тензочутливі перетворювачі (тензорезистори) – є різновидом резистивних перетворювачів, у основі роботи яких лежить явище тензоефекту – зміна опору резистора, виконаного з провідного або напівпровідного матеріалу, при його механічній деформації. Зміна опору дроту при механічному впливі на нього пояснюється зміною геометричних розмірів (довжини, діаметру) і питомого опору матеріалу.

Тензорезистор характеризується наступними величинами:

– відносна зміна опору резистора:

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} \quad (8.1)$$

де ΔR – зміна опору резистора з початковою величиною опору R ,

– відносна зміна лінійного розміру елемента резистора:

$$\varepsilon_\ell = \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (8.2)$$

де $\Delta \ell$ – зміна лінійного розміру з початковою величиною ℓ .

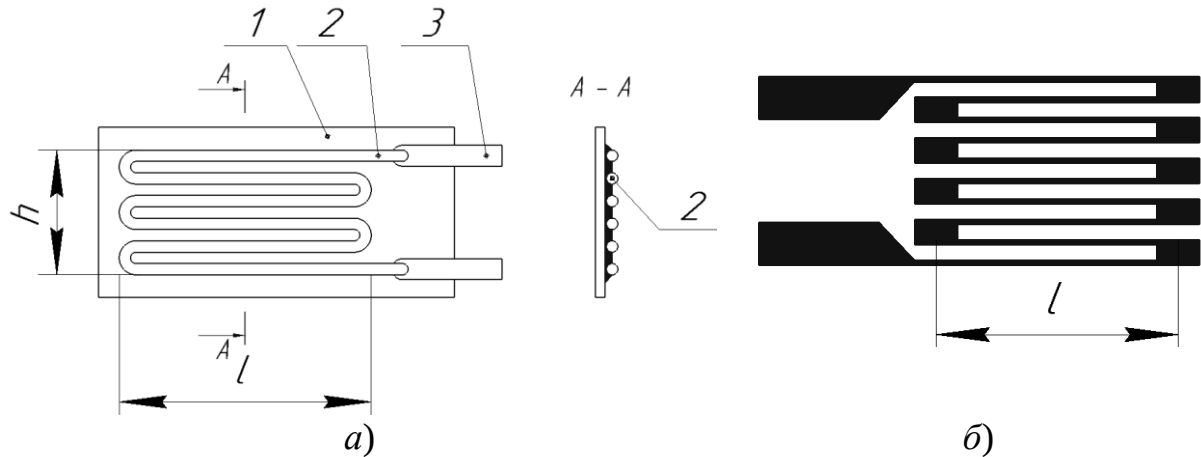
Відношення цих величин одна до одної називають коефіцієнтом відносної тензочутливості, який розраховується за формулою:

$$k = \frac{\Delta R}{\Delta \ell} \quad (8.3)$$

Основні вимоги, що пред'являється до матеріалу дроту тензорезисторів – це можливе якнайбільші значення k та питомого електричного опору і малого температурного коефіцієнту опору.

Дротові тензорезистори виготовляють з дроту з діаметром 0,02 – 0,05 мм з константана, що дає змогу отримати коефіцієнт $k = 1,9 - 2,1$ та низьке значення температурного коефіцієнту (рис. 8.2 а).

Фольгові тензорезистори являють собою чутливий елемент, який отримують шляхом травлення фольги, одна сторона якої покрита лаком або клеєм. При травленні з фольги забирається частина металу таким чином, щоб та частина металу, що залишилася утворює чутливий елемент необхідної форми і опору (рис. 8.2 б).



a – дротовий, *б* – фольговий

Рисунок 8.2 – Тензорезисторні перетворювачі

У теперішній час найбільш широкого застосування тензорезистори, що наклеюються (рис. 8.2 *a*). Тензорезистор являє собою тонкий, зигзагоподібний, прокладений і приклеєний до смужки паперу (підкладки) 1 дріт (дротяна решітка) 2. Елемент включається у схему за допомогою приварених або припаяних виводів 3. Тензорезистор наклеюється на поверхню досліджуваної деталі так, щоб напрямок очікуваної деформації збігався з поздовжньою віссю решітки (вздовж l).

Шкідливий вплив температури усувають шляхом застосування методів температурної компенсації та способів інтенсивного тепловідведення.

Для вимірювання вихідної величини тензорезисторного перетворювача найчастіше застосовують мостові схеми (рис. 8.3).

Істотно вищою тензочутливістю володіють напівпровідникові тензорезистори. Так, напівпровідникові тензорезистори з кристалів кремнію або германію мають коефіцієнт тензочутливості $k = 50 - 200$.

У останні роки з'явилися нові конструкції напівпровідникових тензорезисторних датчиків, у яких напівпровідник (або навіть кілька напівпровідників) вирощується безпосередньо на пружному елементі з кремнію або сапфіру. Такі елементи є більш чутливими та мають гарні пружні властивості. Кілька вирощених одночасно тензорезисторів можуть утворити вимірювальний ланцюг у вигляді моста (або напівмоста).

Малі габаритні розміри, різноманітність конструкцій, надійність і доступність пояснюють широке застосування тензорезисторів для вимірювання деформацій, тисків, зусиль, крутних моментів й інших.

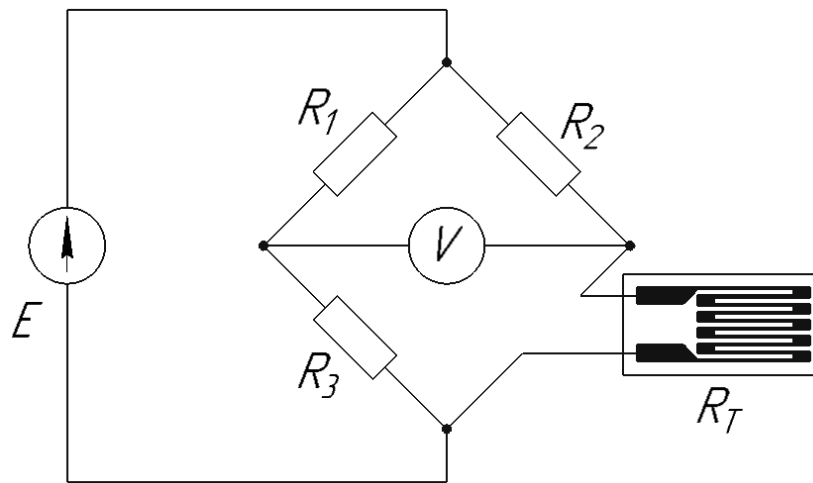


Рисунок 8.3 – Схема включення тензорезистора у мостову схему

Терморезистори

Терморезистор – це пристрій, виконаний з провідного матеріалу або матеріалу з напівпровідниковими властивостями з великим температурним коефіцієнтом опору. При його теплообміні з навколишнім середовищем опір приладу змінюється пропорційно зміні температури навколишнього середовища.

Терморезистори повинні мати максимально високі та постійні значення температурного коефіцієнта опору та хімічну стійкість до впливу навколишнього середовища, достатню тугоплавкість та міцність, велике значення питомого електричного опору.

Провідникові терморезистори виконують з мідного, платинового або нікелевого дроту.

Мідні терморезистори допускають нагрівання не більше 200 °С – при більших температурах мідь окислюється. Рівняння перетворення мідних терморезисторів у діапазоні температур від –200 до +200 °С має практично лінійну характеристику.

Платинові терморезистори допускають нагрівання до 1200 °С без небезпеки окислення або розплавлення. Дані елементи мають нелінійність рівняння перетворення і високу вартість.

Нікелеві терморезистори застосовують у діапазоні температур 250–300 °С. Їхні основні переваги – високий питомий електричний опір і високий температурний коефіцієнт опору.

Напівпровідникові терморезистори (термістори) мають значно більший питомий електричний опір, температурний коефіцієнт у напівпровідникових терморезисторах у 8–10 разів більший, ніж у металів. При малому розмірі мають великий номінальний опір і високу швидкодію. Робочий інтервал температур у більшості напівпровідникових терморезисторів від –100 до +300 °С.

Терморезистор спільно з вимірювальним пристроєм формують термометр опору. Для вимірювання величини опору терморезистора

використовують головним чином автоматичні мости, що здатні до самоврівноваження.

Термоелектричні перетворювачі

Даний тип перетворювачів являють собою ланцюг, який складається з двох або більше з'єднаних між собою різнорідних провідників – термоелектродів (рис. 8.4).

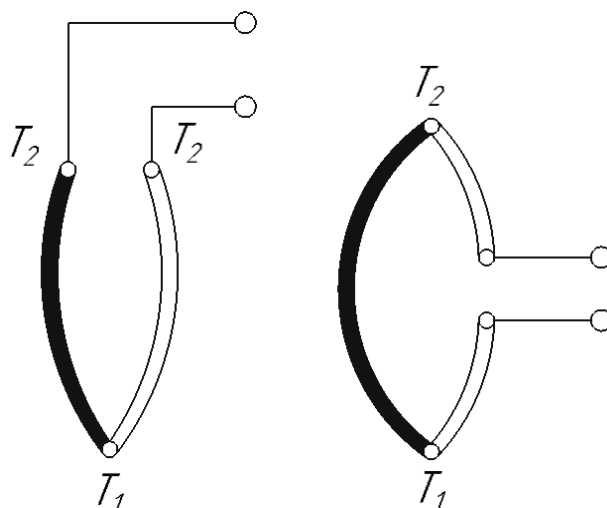


Рисунок 8.4 – Схеми підключення термоелектричних перетворювачів

Місця з'єднань термоелектродів називають спаями. Якщо температури спаїв T_1 і T_2 не дорівнюють одна одній, то в замкнутому ланцюзі буде протікати електричний струм (термострум). Напрямок термоструму залежить від співвідношення температур спаїв. При розмиканні такого ланцюга на її кінцях може бути виміряна термоелектрорушійна сила. Даний ефект має оборотність – при підведенні зовні електричного струму, один із спаїв нагрівається, а інший охолоджується (так званий, ефект Пельтьє).

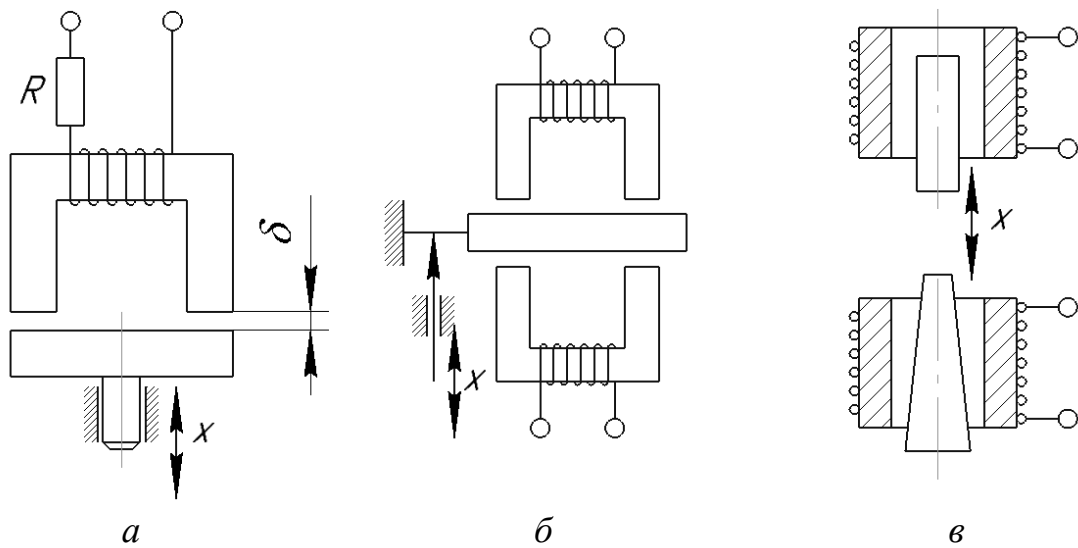
Виникнення зазначених ефектів пояснюється тим, що для різних металів маємо різну роботу виходу електронів і на межі стикання двох різнорідних металів виникає контактна різниця потенціалів. При виникненні різниці температур кінців провідників у останніх виникає дифузія електронів, що також призводить до виникнення різниці потенціалів на кінцях. Термоелектрод, від якого у спайці з меншою температурою струм іде до іншого термоелектрода, вважають позитивним, а інший – негативним.

Для вимірювання високих температур за вимог високої точності вимірювань застосовуються термопари з благородних металів, переважно платино-родієвих.

Індуктивні та взаємоіндуктивні (трансформаторні) вимірювальні перетворювачі.

Індуктивні перетворювачі являють собою котушку індуктивності, а взаємоіндуктивні – котушку взаємної індуктивності, принцип дії яких заснований на залежності індуктивності або взаємної індуктивності обмоток від положення, геометричних розмірів і магнітного стану елементів магнітного ланцюга, і параметри якої змінюються під впливом вхідної величини.

Індуктивність і взаємну індуктивність можна змінювати, впливаючи на довжину або площу поперечного перерізу повітряної ділянки магнітного ланцюга, на магнітну проникність або на втрати в магнітопроводі (рис. 8.5).



а – з одностороннім зазором, б – диференційний (з двостороннім зазором), в – з перемінним перетином магнітного потоку

Рисунок 8.5 – Принципові схеми індуктивних перетворювачів

Індуктивний перетворювач (рис. 8.5 а) зі змінною довжиною повітряного зазору δ характеризується нелінійної (близькою до гіперболічної) залежністю $L = f(\delta)$. Робочий рух у таких перетворювачах становить 0,01 – 10 мм.

У диференційних перетворювачах (рис. 8.5 б) переміщення рухомого елемента викликає збільшення індуктивності однієї обмотки і зменшення індуктивності іншої.

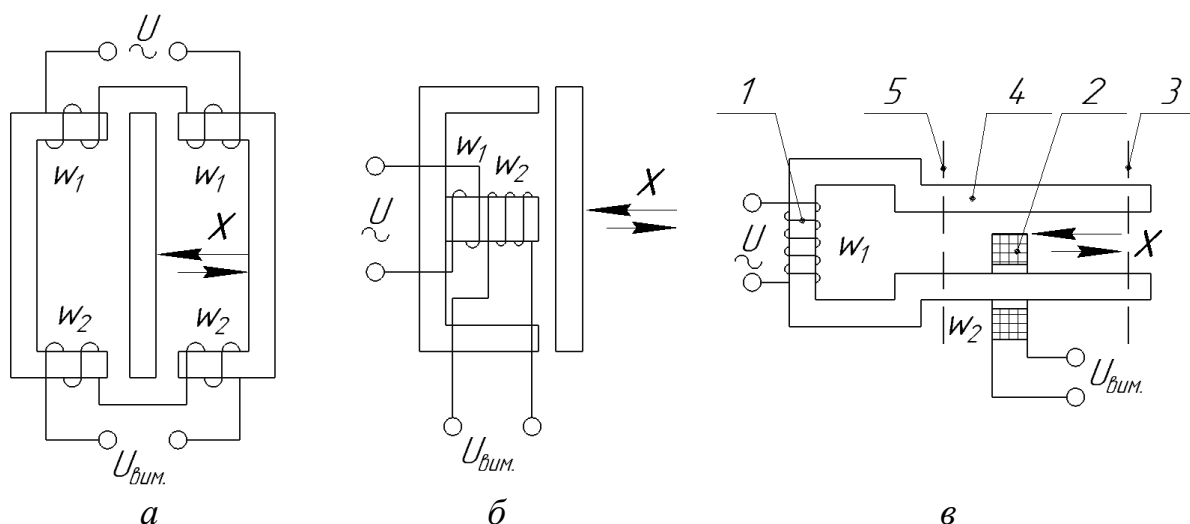
Перетворювач з розімкненим магнітним ланцюгом (рис. 8.5 в) являє собою обмотку, намотану на пластмасовий каркас, всередині якого переміщується осердя з феромагнітного матеріалу. Переміщення осердя викликає зміну індуктивності котушки. Даний тип перетворювача застосовується для вимірювання переміщень у діапазоні 1 – 100 мм.

Кілька типів взаємоіндуктивних (трансформаторних) перетворювачів наведено на рис. 8.6.

На рис. 8.6а представлено перетворювач, у якого зміна повітряного зазору викликає зміну магнітного опору і величини взаємної індуктивності обмоток, що викликає амплітуду змінної напруги на виході.

На рис. 8.6б перетворювач має диференційну конструкцію, у якій вихідні обмотки ввімкнено зустрічно, така конструкція дозволяє отримати при симетричному розташуванні якоря, напругу на виході, що дорівнює нулю, а зсув якоря відносно нейтрального положення викликає появу вихідної напруги з одночасною зміною фази напруги.

На рис. 8.6в представлено перетворювач з розподіленими магнітними параметрами, який можна застосовувати для вимірювання значних лінійних переміщень. Конструктивно перетворювач складається з обмотки збудження 1 і рухомий обмотки 2, при переміщенні якої від положення 3 до положення 5 вздовж магнітопроводу 4 з робочою частиною у вигляді двох паралельних смуг, напруга на вимірній обмотці 2 зростає за лінійним законом.



а – з повітряним зазором, б – диференційний, в – з розподіленими магнітними параметрами

Рисунок 8.6 – Принципові схеми трансформаторних перетворювачів

Індуктивні перетворювачі мають високу чутливість значну і потужність вихідного сигналу. У якості вимірних ланцюгів даних перетворювачів зазвичай використовують невідновлені мости змінного струму.

Ємнісні вимірні перетворювачі.

У ємнісних перетворювачів електрична ємність або діелектричні втрати, що залежить від розмірів, взаємного розташування обкладинок і від діелектричної проникності середовища між ними, змінюються під дією вимірюваної величини (рис. 8.7).

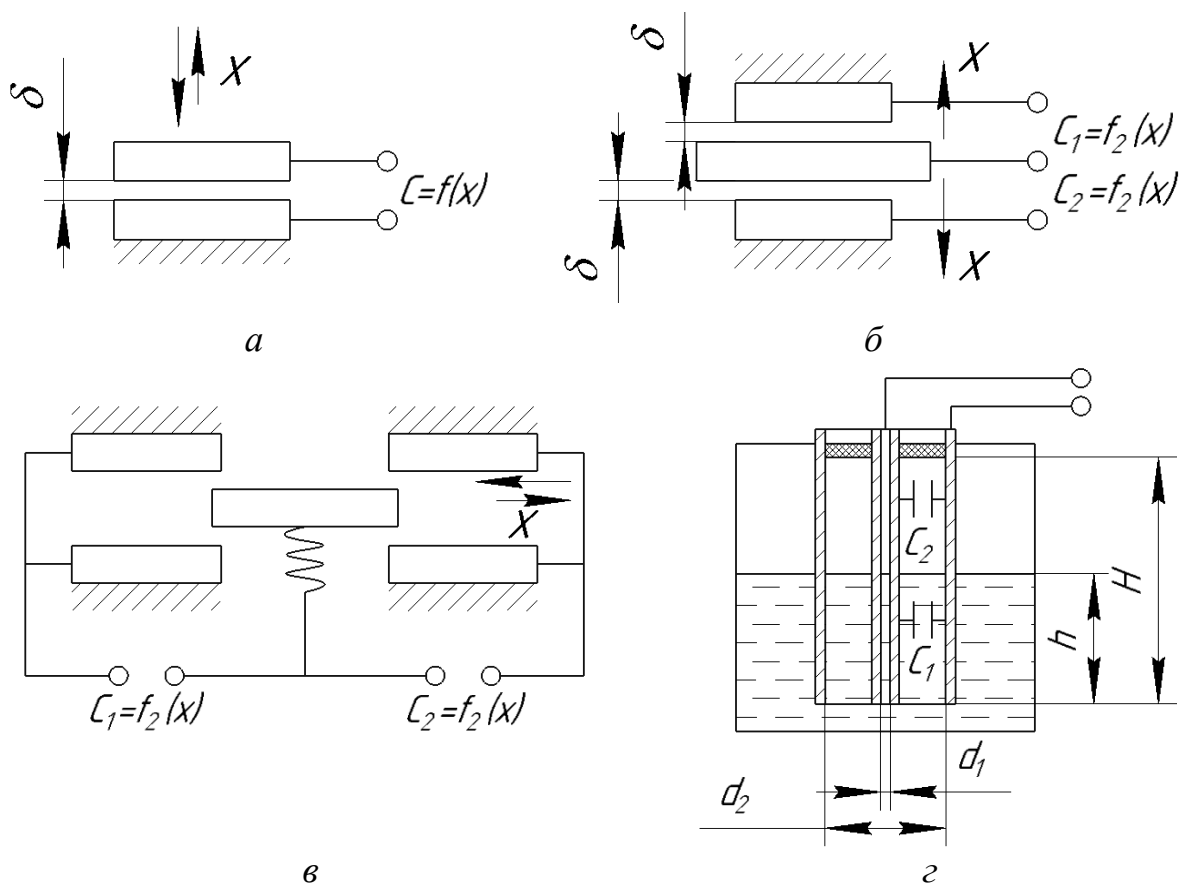
Представлений на рис 8.7а перетворювач являє собою конденсатор, одна пластина якого переміщується відносно іншої, що призводить до

зміни відстані δ між пластинами. Функція залежності $C = f(\delta)$ є нелінійною, а чутливість перетворювача зростає зі зменшенням зазору, який обмежується напругою пробою конденсатора. Ці перетворювачі використовуються для вимірювання малих переміщень (менше 1 мм).

На рис. 8.7б представлено диференційний ємнісний перетворювач, в якому при переміщенні центральної пластини ємність однієї частини конденсатора збільшується, а іншого – зменшується. Така конструкція дозволяє зменшити нелінійність та збільшити діапазон контрольованих переміщень.

На рис. 8.7в показано диференційний перетворювач, у якому відбувається зміна активної площі пластин, а необхідну функцію перетворення можна отримати шляхом відповідного профілювання пластин конденсатора.

На рис. 8.7г представлено ємнісний перетворювач для вимірювання рівня рідини – ємність утвореного електродами конденсатора залежить від рівня рідини, діелектрична провідність якої відрізняється від діелектричної проникності повітря.



a – зі змінною довжиною зазору, *б* – зі змінним перетином зазору, *в* – диференційний, *г* – для вимірювання рівня рідини

Рисунок 8.7 – Принципові схеми ємнісних перетворювачів

У якості вимірювальних ланцюгів ємнісних перетворювачів зазвичай використовують невірноважені мости змінного струму. Ємнісні

перетворювачі живлять струмом підвищеної частоти (до десятків мегагерц) – це дозволяє збільшити потужність вихідного сигналу і зменшити шунтуючу дію опору ізоляції.

Перевагами ємнісних перетворювачів є простота конструкції, висока чутливість та мала інерційність. Недоліки цих пристроїв – залежність роботи від наявності зовнішніх електричних полів, вплив «паразитних» ємностей, температури та вологості.

Висновки: Кількість вимірювань неелектричних величин суттєво перебільшує кількість вимірюваних електричних. Для вимірювання перших досить зручним виявилось їх перетворення у зміну контрольованих за допомогою електровимірювальних приладів електричних параметрів. Реалізація цього принципу здійснюється за допомогою вимірювальних перетворювачів, що мають різноманітну реалізацію та принцип дії. Основний спосіб підключення перетворювачів для здійснення вимірювання електровимірювальними приладами є мостові схеми.

Зміст звіту

У звіті навести:

- навести схеми та принципи дії резистивних (реостатних) перетворювачів,
- навести схеми та принципи дії тензорезисторів,
- навести схеми та принципи дії термоелектричних перетворювачів,
- навести схеми та принципи дії індуктивних і трансформаторних перетворювачів,
- навести схеми та принципи дії ємнісних вимірювальних перетворювачів,
- письмово відповісти на контрольні питання та виконати поставлені завдання.

Контрольні питання

1. Визначити поняття «вимірювальний перетворювач».
2. Які матеріали використовують для виготовлення резистивних перетворювачів?
3. Що являють собою фольгові тензорезистори?
4. Визначити поняття «терморезистор».
5. Які діапазони переміщень можна здійснювати за допомогою індуктивних перетворювачів?
6. Який принцип покладено у принцип дії ємнісного перетворювача для вимірювання рівня рідин?

Література: [12, 13, 14, 15, 16].

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ ISO 80000-1:2016 Величини та одиниці. Частина 1. Загальні положення (ISO 80000-1:2009; ISO 80000-1:2009/Cor.1:2011, IDT) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=69018. – Назва з екрана.
2. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т. Володарський, В.В. Грабко ; [за ред. проф. В.В. Кухарчука]. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. – 538 с.
3. Основи метрології та електричні вимірювання : навч. посіб. / М. Дорожовець, Р. Івах, В. Мотало та ін. ; [за ред. д-ра техн. наук Б. Стадника]. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2011. – 372 с.
4. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Метрологічне забезпечення. Основні положення [Електронний ресурс]. – К. : Держстандарт України, 1994. – Режим доступу : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78591. – Назва з екрана.
5. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення [Електронний ресурс]. – К. : Держстандарт України, 1994. – Режим доступу : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78591. – Назва з екрана.
6. Хрусталёва, З.А. Электротехнические измерения. Практикум : учеб. пособие / З.А. Хрусталёва. – М. : КНОРУС, 2016. – 240 с.
7. Лавренова, Д.Л. Основи метрології та електричних вимірювань : навч. посіб. / Д.Л. Лавренова, В.М. Хлистов. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 123 с.
8. Электрические измерения : учеб. пособие для вуз. / В.Н. Малиновский, Р.М. Демидова-Панферова, Ю.Н. Евланов и др. ; [под ред. В.Н. Малиновского]. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 416 с.
9. Атамалян, Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин : учеб. пособие для студ. вуз. / Э.Г. Атамалян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1989. – 384 с.
10. Електричні вимірювання : навч. посіб. / Л.Д. Дудюк та ін. – Львів : Афіша, 2003. – 272 с.
11. Поліщук, Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / Є.С. Поліщук. – Львів : Новий світ, 2003. – 460 с.
12. Фремке, А.В. Электрические измерения / А.В. Фремке, Е.М. Душин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1980. – 392 с.
13. Миронов, Э.Г. Методы и средства измерений / Э.Г. Миронов. – М. : Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – 463 с.
14. Панфилов, В.А. Электрические измерения / В.А. Панфилов. – М. : Академия, 2006. – 288 с.
15. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) : підручник / В.М. Ванько, Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець та ін. ; [ред. Є.С. Поліщук, В.М. Ванько] ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів, 2015. – 580 с.
16. Засоби та методи вимірювання неелектричних величин : підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.І. Стадник та ін. ; [за ред. Є.С. Поліщука]. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 618 с.