

Міністерство освіти і науки України
Дніпровський державний технічний університет

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни "Метрологія і електротехнічні вимірювання"
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
денної та заочної форм навчання

Затверджено редакційно-видавницькою
секцією науково-методичної ради ДДТУ
"18 " 05 2017 р., протокол № 5

Кам'янське
2017

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу Дніпровського державного технічного університету заборонено.

Конспект лекцій з дисципліни "Метрологія і електротехнічні вимірювання" освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форм навчання/ Укладач Ю.Ю. Шрамко. - Кам'янське 2017. – 94 с.

Відповідальний за випуск: В.Б. Нізімов, д.т.н., професор

Рецензент: С.В.Количев, к.т.н., доцент

Затверджено на засіданні кафедри ЕТЕМ

Протокол № 5 від 17.05.2017 р.

Коротка анотація видання. Конспект лекцій з дисципліни "Метрологія і електротехнічні вимірювання" освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форм навчання для підготовки до занять та самостійного вивчення матеріалів курсу.

ЗМІСТ

Введення.....	6
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНУ АПАРАТУРУ	7
1.1 Метрологія й метрологічне забезпечення.....	7
1.2 Номенклатура основних величин, що підлягають вимірюванням в електротехніці, електроенергетиці й електроніці	9
1.3 Номенклатура параметрів середовища життєдіяльності, що підлягають вимірюванням	9
1.4 Засоби вимірювань, різновиди	11
1.5 Характеристики якості результатів вимірювань	14
1.6 Запитання для самоконтролю.....	17
2 ЗМІСТ ТА ЕТАПИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	18
2.1 Основні етапи вимірювальних технологій	18
2.2 Приклади взаємодії датчиків з об'єктом вимірювань	20
2.3 Запитання для самоконтролю.....	24
3 МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ	25
3.1 Загальні положення.....	25
3.2 Характеристики погрішності засобів вимірювань	26
3.3 Характеристики перетворення вимірюваної величини й сигналів вимірювальної інформації.....	28
3.4 Характеристики взаємодії з об'єктом і зовнішніми засобами вимірювань.....	31
3.5 Метрологічні характеристики аналогових вимірювальних приладів	31
3.6 Метрологічні характеристики цифрових вимірювальних приладів.....	33
3.7 Метрологічні характеристики аналогових вимірювальних перетворювачів.....	36
3.8 Метрологічні характеристики аналого-цифрових і цифроаналогових вимірювальних перетворювачів.....	37
3.9 Метрологічні характеристики однозначних і багатозначних мір	39
3.10 Запитання для самоконтролю.....	40
4 АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ. ПРИНЦИПИ ДІЇ, ВЛАСТИВОСТІ Й ЗАСТОСУВАННЯ	41
4.1 Загальні характеристики.....	41

4.2 Прилади магнітоелектричної системи	45
4.3 Прилади електродинамічної системи.....	50
4.4 Прилади феродинамічної системи	53
4.5 Прилади електромагнітної системи	54
4.6 Прилади електростатичної системи	55
4.7 Прилади індукційної системи.....	56
4.8 Засоби розширення меж вимірювання й правила вибору відповідної межі	59
4.8.1 Типові способи й засоби розширення меж вимірювань	59
4.8.2 Шунти	60
4.8.3 Додаткові опори	62
4.8.4 Вимірювальні трансформатори струму	63
4.8.5 Вимірювальні трансформатори напруги.....	65
4.8.6 Правило вибору меж вимірювання	65
4.9 Застосування аналогових приладів для вимірювань у трифазних колах змінного струму	66
4.9.1 Вимірювання лінійних струмів і напруг у трифазному трипроводному колі	67
4.9.2 Вимірювання активної електричної потужності й енергії в симетричних трифазних колах одним приладом.....	67
4.9.3 Вимірювання реактивної електричної потужності й енергії в симетричних трифазних колах одним приладом.....	68
4.9.4 Вимірювання активної електричної потужності й енергії в трифазному ланцюзі за допомогою двох приладів.....	70
4.10 Запитання для самоконтролю.	71
5 МОСТОВІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ	72
5.1 Мости постійного струму	72
5.1.1 Мости постійного струму в рівноважному режимі.....	72
5.1.2 Мости постійного струму в нерівноважному режимі	75
5.2 Мости змінного струму.....	77
5.2.1 Умови рівноваги мостів змінного струму.....	77
5.2.2 Міст змінного струму для вимірювання ємності конденсатора	78
5.2.3 Міст змінного струму для вимірювання індуктивності котушки....	79
5.3 Метрологічні характеристики мостів.....	80
5.4 Запитання для самоконтролю.....	81

6	ЦИФРОВІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ.....	83
6.1	Цифроаналогові перетворювачі	83
6.2	Аналого - цифрові перетворювачі.....	85
6.2.1	АЦП порозрядного зрівноважування.....	85
6.2.2	АЦП розгортаючого перетворення	87
6.2.3	АЦП “частота - код”	88
6.2.4	АЦП “інтервал часу - код”	89
6.2.5	Інтегруючі АЦП	90
6.2.6	Метрологічні характеристики АЦП.....	92
6.2.7	Зв'язок АЦП із комп'ютером.....	92
6.3	Цифрові вимірювальні прилади	93
6.4	Перешкоди й боротьба з ними.....	94
6.5	Запитання для самоконтролю.....	96
	Список використаної літератури	97

Введення

Завдання інтенсифікації виробництва, що стоять перед промисловістю й наукою нашої країни, вимагають створення нових й удосконалювання наявних технологічних процесів і матеріалів, строгого контролю якості продукції. Зростає роль вимірювань як у науковому експерименті, так і на виробництві. Це повною мірою ставиться до вимірювань електричних і неелектричних величин, методи яких мають широку область застосування, відрізняються універсальністю, швидкодією, сумісністю з новими технічними засобами.

Нові можливості відкрилися перед вимірювальною технікою після появи мікропроцесорів, застосування яких дозволило не тільки істотно збільшити точність і швидкодію приладів, розширити їхні функціональні можливості, але й розробити якісно нові "інтелектуальні" пристрої, здатні провадити керування процесом вимірювання, автоматично вибирати необхідний діапазон вимірювань, здійснювати автокалібрування, обробляти результати вимірювання й представляти їх оператору в упорядкованій формі. Є також можливість об'єднання декількох взаємно доповнюючих приладів, разом з ЕОМ у єдиний інформаційно-обчислювальний комплекс.

Ускладнення технологічних циклів призвело до необхідності одночасного визначення великої кількості параметрів і фізичних величин, зросла роль динамічних вимірювань. Автоматизація складних виробничих процесів нерозривно пов'язана із застосуванням інформаційно-вимірювальних систем, що забезпечують одержання оперативної вимірювальної інформації в належному обсязі й ефективно керування плином технологічного процесу.

Даний конспект лекцій призначений для студентів вищих навчальних закладів, що прослуховують курс «Електричні вимірювання».

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНУ АПАРАТУРУ

1.1 Метрологія й метрологічне забезпечення

Метрологія (*metrology*) - сфера діяльності й наука про вимірювання, методи й засоби забезпечення їхньої єдності й способах досягнення необхідної точності.

Вимірювання (*measurement*) - пізнавальний процес, що полягає в знаходженні чисельного значення вимірюваної величини (*of a measurand*) дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів, називаних засобами вимірів.

Вимірювана величина (*measurand*) - величина, що підлягає виміру.

Величина (*quantity*)- властивість (атрибут) фізичного об'єкта (явища, речовини, виробу, біологічного об'єкта), що може визначатися кількісно.

Розмір величини (*size of a quantity*) - кількісний вміст у даному об'єкті властивості, що відповідає поняттю “величина”.

Значення величини (*value of a quantity*) - вираження розміру величини у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць.

Одиниця величини (*unit of a quantity*)- величина фіксованого розміру, який умовно привласнене числове значення, рівне одиниці.

Єдність вимірювань (*traceability of a measurement*) - стан вимірювань, при якому їхні результати виражені в узаконених одиницях величин і погрішності вимірювань не виходять за встановлені границі із заданою ймовірністю.

Досягнення єдності вимірювань приводить до забезпечення взаємної довіри до результатів вимірювань поза залежністю від місця їхнього виконання. Подібний стан вимірювань здобуває особливе значення для наукового, технічного й економічного співробітництва й торгівлі, при вирішенні спірних питань і претензій як усередині країн, так і на міждержавному рівні. Не випадково тому першою міждержавною угодою в історії нашої планети, підписаним 20 травня 1875 року, з'явилася Метрична Конвенція, а першою міжурядовою організацією - Міжнародне Бюро Мір і Ваг (МБМВ або в латинській аббревіатурі французького походження - BIPM).

Метрологічне забезпечення (*metrological assurance*) - установлення й застосування наукових й організаційних основ, технічних засобів, правил і

норм, необхідних для досягнення єдності й необхідної точності вимірів, які виконуються в усіх без винятку сферах діяльності людини.

Метрологічне забезпечення галузей науки й промисловості, екологічного моніторингу, охорони здоров'я, торгівлі, контролю безпеки, озброєнь і судового виробництва полягає у виконанні наступних основних функцій:

- розробка, виготовлення й зберігання державних еталонів, що відтворюють одиниці вимірюваних величин,
- здійснення міжнародних звірень державних еталонів, передача розмірів одиниць величин робочим засобам вимірювань,
- розробка законодавчих актів і нормативних документів в області метрології й практичних вимірювань, контроль за їхнім виконанням,
- розробка й промисловий випуск робочих засобів вимірювань,
- контроль за станом і схоронністю декларованих виробником метрологічних властивостей засобів вимірювань, що випускають із виробництва, а також перебувають в експлуатації або на зберіганні,
- виконання робочих вимірювань у всіх сферах діяльності й у галузях народного господарства,
- розробка методик виконання вимірювань, що включають у себе методики оцінки характеристик погрешностей результатів вимірювань, виконання вимірів, контроль за виконанням методик виконання вимірювань.

Основні роботи з метрологічного забезпечення, виконувані в інтересах держави, а саме, розробка й зберігання державних еталонів, фундаментальні дослідження в області метрології, розробка державних нормативних документів, державний метрологічний нагляд підлягають обов'язковому державному фінансуванню. При розробці федеральних й інших державних програм, у тому числі, програм створення й розвитку виробництва оборонної техніки в них повинні бути передбачені розділи метрологічного забезпечення.

До подібних програм відносяться програми забезпечення всіх видів безпеки населення стосовно причин техногенного, екологічного, медичного, злочинного й іншого характеру.

1.2 Номенклатура основних величин, що підлягають вимірюванням в електротехніці, електроенергетиці й електроніці

В електротехніці, електроенергетиці й електроніці виміру підлягають:

- всі електричні величини (сила струму, напруга, параметри змінного струму й напруги, електричні потужність й енергія, поверхневий й об'ємний електричний заряд, електричні характеристики матеріалів, параметри електричних, магнітних й електромагнітних полів, параметри електричних ланцюгів - опір, індуктивність, ємність, і багато хто інші),
- состав і властивості електротехнічних й інших матеріалів,
- температура від 4 до 2000 К й вище,
- маса, сила, деформації, моменти обертання й гальмування,
- тиск, швидкість і витрата рідин і газів,
- параметри вібрацій (вібропересування, віброшвидкість і віброприскорення),
- швидкість обертання,
- лінійні й кутові переміщення,
- рівень і доза радіації,
- акустичні величини,
- параметри навколишнього середовища, що впливають на безпеку життєдіяльності працівників,
- параметри промислових викидів, що підлягають екологічному моніторингу, і багато чого іншого в широкому діапазоні зміни вимірюваних величин при різноманітних робочих умовах експлуатації обладнання.

1.3 Номенклатура параметрів середовища життєдіяльності, що підлягають вимірюванням

Перелік параметрів середовища життєдіяльності, що підлягають вимірюванням, запозичений з довідника “Метрологічне забезпечення безпеки праці” (В 2 томах, ред. И.Х.Сологян, М.: Видавництво стандартів, 1998, 1999 р.) і приводиться в таблиці 1.

Таблиця 1 - Параметри середовища життєдіяльності, що підлягають вимірам

Найменування параметра, що підлягає виміру		Діапазон вимірювання	Вимога до точності
1. Параметри електричного струму, напруги, електричного й магнітного полів			
1.1. Постійна напруга	V	40 (припуст. рів.) 650 (припуст. рів.)	(0.5÷1.5)% - “ -
1.2. Змінна напруга, 50 Гц (діюче знач.)	V	36 (припуст. рів.) 650 (припуст. рів.)	- “ - - “ -
1.3. Постійний струм	A	0.015 (припуст. рів.)	- “ -
1.4. Змінний струм, частота 50 Гц	A	0.006 (припуст. рів.)	- “ -
1.5. Напруженість електростатичного поля	кВ/м	0.3 - 2500	(10÷20)%
1.6. Напруженість магнітного поля,	кА/м	0 - 1600	(10÷20)%
1.7. Індукція магнітного поля	Тл	0 - 2.0	(5÷10)%
1.8. Напруженість електромагнітного поля	кВ/м		
частота $f < 50$ Гц		0 ÷ 1000	5%
$50 \leq f < 1000$ Гц		0 ÷ 1000	5%
$1000 \leq f < 12000$ Гц		0 ÷ 1000	5%
$12000 \leq f < 60000$ Гц		0 ÷ 1000	5%
$0.06 \leq f < 300$ МГц		0 ÷ 1000	5%
2. Параметри вібрації			
2.1. Середньоквадр. значення віброшвидкості	м/с	0 ÷ 0.1	(3÷5)%
2.2. Середньоквадр. значення віброприскорення	м/с ²	0 ÷ 3	(3÷5)%
3. Параметри шуму			
3.1. Звуковий тиск інфразвуку $2 \leq f < 40$ Гц	дцБ	0 ÷ 110	0.5
3.2. Звуковий тиск звуку $40 \leq f < 8000$ Гц	дцБ	0 ÷ 110	0.5
3.3. Звуковий тиск ультразвуку	дцБ	0 ÷ 110	0.5
4. Параметри атмосферного повітря			
4.1. Температура	°C	10 ÷ 30	0.5
4.2. Відносна вологість	%	40 ÷ 60	5
4.3. Тиск повітря	Па	$(0.8 \div 1.3) \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2$
4.4. Швидкість руху повітря	м/с	0 ÷ 5	0.1
4.5. Пилевий фактор	мг/м ³	0 ÷ 10	25%
4.6. Концентрація токсичних газів		Залежить від виду газу	
5. Параметри випромінювань			
5.1. Інтенсивність теплового випромінювання	Вт/м ²	10 ÷ 1000	5%
5.2. Випромінювання оптичного діапазону	Вт/м ²	0 ÷ 500	(10 ÷ 0)%
у тому числі: яскравість видимого світла	Кд/м ²	0 ÷ 4000	<10%
освітленість видимим світлом	лк	0 ÷ 3000	<5%
5.3. Іонізуючі випромінювання	Р/год	(0.01 ÷ 107)	25%
5.4. Аероіонізація	1/см ³	$(10^2 \div 10^6)$	50%
5.5. Інфрачервона радіація	Вт/м ²	1 ÷ 500	(15 ÷ 50)%
5.6. Ультрафіолетова радіація	Вт/м ²	$10^{-4} \div 10^{-2}$	15%
5.7. Лазерне випромінювання	лк	$10^{-2} \div 10^3$	20%
5.8. Небезпечні фактори вибуху й пожежі			

Методи й засоби вимірювань, що допускають норми параметрів установлюються стандартами Системи Стандартів Безпеки Праці (ССБТ, позначення стандартів цієї системи: ДСТ 12.X. XXX “ССБТ. Назва стандарту”), стандартами Державної Системи забезпечення єдності вимірів

(ДСІ, позначення стандартів цієї системи: ДСТ 8.XXX “ДСІ. Назва стандарту”), стандартами на об'єкти промисловості, продукцію, види робіт.

1.4 Засоби вимірювань, різновиди

Якість виконуваних вимірювань у значній мірі визначається якістю застосовуваного технологічного обладнання й коректністю його використання у вимірювальних технологіях.

Використовуване технологічне обладнання:

- вимірювальні інструменти - засоби вимірювань - основне обладнання,
- допоміжне устаткування, у тому числі, засоби обчислювальної техніки - комп'ютери, процесори, мікропроцесори, периферійні пристрої.

Засіб вимірювань (*measuring instrument*) - технічний засіб, призначений для виконання вимірів й маючий нормовані метрологічні характеристики.

Метрологічні характеристики (*metrological characteristics*) - характеристики властивостей засобів вимірювань, що роблять вплив на результати й погрішності вимірювань.

Якість основного технологічного обладнання - засобів вимірювань визначається його метрологічними характеристиками, їхньою схоронністю в часі й незалежністю від дії зовнішніх факторів, що впливають.

Засоби вимірювань підрозділяються на наступні 4 види.

Міра (*material measure*) - засіб вимірювань, призначений для відтворення фізичної величини одного або декількох заданих розмірів з нормованою точністю.

Однозначна міра - міра, що відтворює фізичну величину одного розміру. Наприклад, гиря, стрижень довжиною 1 метр, нормальний елемент, котушка опору розміром 1 Ом, стандартний зразок двокомпонентної речовини (газу, рідини, сплаву).

Багатозначна міра - міра, що відтворює одну фізичну величину декількох розмірів. Наприклад, набір гир різної маси, магазин опорів.

Стандартний зразок - засіб вимірювання у вигляді речовини (матеріалу), склад або властивість якого встановлені при атестації.

Калібратор - багатозначна міра, як правило, що допускає керування від комп'ютера.

Вимірювальний прилад (measuring instrument) - засіб вимірювань, призначений для одержання значень вимірюваної величини у формі, доступної для безпосереднього сприйняття оператором.

Аналогові й цифрові вимірювальні прилади відрізняються видом представлення (індикації) значень вимірюваної величини. Безліч значень, які представляє індикатор аналогового приладу, - постійна. Найпоширенішими аналоговими вимірювальними приладами є стрілочні вимірювальні прилади, у яких відлік значення вимірюваної величини здійснюється по взаємному положенню стрілки (або іншого вказівника) і матеріальної шкали. При цьому найчастіше рухлива стрілка переміщається щодо нерухомої шкали. Іноді рухливою є шкала, а стрілка (вказівник) нерухома. У деяких аналогових приладах (наприклад, ртутних термометрах) значення вимірюваної величини перетворюється в довжину візуально фіксованого відрізка, постаченого шкалою.

Індикатор цифрового приладу є цифровим і представляє результати вимірів в одиницях вимірюваної величини з дискретної безлічі значень, розділених, як правило, однаковими інтервалами, названими *інтервалами квантування*. Ширина інтервалу квантування є не що інше, як погрішність округлення, і обернено пропорційна кількості розрядів коду (як правило, десяткового), застосовуваного в конкретному приладі.

Вимірювальний перетворювач (measuring transducer) - засіб вимірів, призначений для взаємооднозначного перетворення *сигналу вимірюваної величини* або *сигналу вимірювальної інформації*, що діє на вході перетворювача, у вихідний сигнал, зручний для подальших перетворень, обробки, передачі й (або) зберігання.

Сигнал вимірюваної величини - вимірювана величина, що змінюється в часі. Сигнал вимірюваної величини - окремий випадок сигналу вимірювальної інформації.

Сигнал вимірювальної інформації - сигнал, функціонально взаємно однозначно пов'язаний із сигналом вимірюваної величини.

Вихідний сигнал вимірювального перетворювача не може бути безпосередньо сприйнятий оператором без застосування індикатора.

Датчик (сенсор, первинний вимірювальний перетворювач) - вимірювальний перетворювач, на який безпосередньо діє вимірювана величина. Під дією вимірюваної величини датчик виробляє сигнал вимірювальної

інформації, тобто сигнал, функціонально взаємооднозначно пов'язаний із сигналом вимірюваної величини.

Вимірювальними перетворювачами крім датчиків є підсилювачі, фільтри (вторинні вимірювальні перетворювачі), комутатори, перетворювачі безперервних (аналогових) величин у цифровий код (*аналого-цифрові перетворювачі*, АЦП), перетворювачі цифрового коду в аналоговий сигнал струму або напруги (*цифроаналогові перетворювачі*, ЦАП).

Приклади вимірювальних перетворювачів: термopара, вимірювальний трансформатор, вимірювальний підсилювач, термометр опору, датчики тиску, параметрів вібрацій, швидкості газу й ін.

Вимірювальна інформаційна система (measuring information system) - засіб вимірювань, призначений для виміру декількох однорідних або неоднорідних величин і уявляючий собою сукупність датчиків, вимірювальних перетворювачів і допоміжних пристроїв, що функціонують, як єдине ціле.

Звичайно ВІС складається з декількох (до декількох тисяч) вимірювальних каналів. Кожен канал являє собою послідовне з'єднання вимірювальних перетворювачів, першим з яких є датчик. За допомогою комутатора, керованого від процесора, сигнали вимірювальної інформації кожного з каналів по черзі підключаються на вхід АЦП, на виході якого при кожному такому підключенні формується числовий еквівалент значення відповідної вимірюваної величини, як правило, у двійковому коді. Отримані в такий спосіб числа передаються в комп'ютер (або в процесор), де виконується зіставлення кожного із цих чисел зі шкалою відповідної вимірюваної величини, представленої в комп'ютері в тім же коді. У результаті цього зіставлення формуються значення вимірюваних величин у їхніх одиницях і тим самим виконується прямий вимір. Наступні операції (математична обробка, зберігання, передача, візуалізація результатів вимірів) виконується відповідно до цілей експерименту комп'ютером й іншими засобами, що входять до складу системи.

Багато сучасних ВІС будуються на базі комп'ютерних мереж. Диспетчеризація роботи таких розподілених ВІС й обмін інформацією виконуються за допомогою мережного програмного забезпечення й засобів міжмашиного зв'язку (телефонні канали, радіоканали, оптоволоконні лінії зв'язку, канали супутникового зв'язку й інші). Для з'єднання із цими каналами передбачається відповідний модем.

1.5 Характеристики якості результатів вимірювань

Результат будь-якого вимірювання відрізняється від правдивого значення вимірюваної величини в силу наступних причин:

- недосконалість засобів вимірювань,
- некоректне застосування засобів вимірювань, у результаті якого можуть змінюватися властивості об'єкта,
- вплив на засіб вимірювань різноманітних факторів, що заважають, *називаними величинами, що впливають.*

Впливаюча величина (*influence quantity*) - величина, що робить вплив на результати й на погрішності вимірювань, але не є вимірюваною.

Припустимо спочатку, що вимірювана величина не змінюється в часі, а її істинне значення є x . Нехай $\tilde{x}$ результат виміру, тоді різниця $\Delta x = \tilde{x} - x$ є *абсолютна погрішність результату вимірювань*.

Істинне значення вимірюваної величини, звичайно, невідомо. Тому в наступному тексті цей термін використовується як модельне поняття, що бере участь в описі математичної моделі вимірів і погрішностей вимірів.

Абсолютна погрішність результату вимірів (*absolute error*) - різниця між результатом вимірювання й істинним значенням вимірюваної величини, виражається в одиницях вимірюваної величини.

Значення абсолютної погрішності не може бути визначене у вигляді числа через те, що істинне значення x вимірюваної величини невідомо. Із цієї причини результат кожного вимірювання містить непереборну невизначеність значення вимірюваної величини, і тому на практиці може йти мова тільки про оцінку яких-небудь характеристик погрішності вимірів, але не значень погрішності. Найпоширенішою характеристикою погрішності є інтервал (Δ_H, Δ_B) , обмежений граничними або значеннями, що припускають гранично. Звичайно приймають $\Delta_H = -\Delta_B = -\Delta_X$, тобто вважають цей інтервал симетричним щодо нуля: $(-\Delta_X, \Delta_X)$.

В загальному випадку погрішність вимірювання Δx може містити систематичну й випадкову складові.

Систематична складова погрішності, систематична погрішність) - погрішність, значення якої залишаються незмінними при повторних

вимірюваннях однієї й тієї ж незмінної вимірюваної величини в однакових умовах.

Випадкова складова погрішності, випадкова погрішність - погрішність, значення якої змінюються випадковим образом при повторних вимірюваннях однієї й тієї ж незмінної вимірюваної величини в однакових умовах.

При багаторазовому вимірюванні величини, істинне значення якої дорівнює x , результати вимірювань будуть попадати на вісь із різною щільністю, що буде визначатися характером випадкової складової погрішності. Звичайно з найбільшою щільністю результати вимірювань групуються поблизу значення $x + \Delta_c$, де Δ_c - систематична складова погрішності вимірювань. У цьому випадку вид кривій, що описує щільність розподілу результатів вимірювань, буде мати дзвонообразний вид, як це показано в правій частині мал. 1 а. Нехай $\tilde{x}$ - один з результатів вимірювань. Відповідно до визначення абсолютної погрішності ми можемо укласти, що форма щільності розподілу $\Delta x = \tilde{x} - x$, представленої в лівій частині мал. 1 а, повинна повторювати форму щільності розподілу результатів вимірів. Тоді можна призначити такі границі ($-\Delta_x, \leq \Delta_x$), щоб інтервал, що лежить між ними містив суму обох складові погрішності з імовірністю P_0 . Цей інтервал представлений графічно в лівій частині мал. 1 а, а його математичний запис має вигляд:

$$P(-\Delta_x \leq \Delta x \leq \Delta_x) = P_0, \quad (1)$$

де Δ_x є не що інше, як характеристика загальної абсолютної погрішності результату вимірювання, $P(\bullet)$ - імовірність події, позначеного в дужках.

У цій ситуації із правої частини мал. 1 а видно, що по результаті $\tilde{x}$ однократного вимірювання про істинне значення вимірюваної величини можна укласти, що із цією ж ймовірністю воно перебуває в межах $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$, тобто

$$P(\tilde{x} - \Delta_x \leq x \leq \tilde{x} + \Delta_x) = P_0. \quad (2)$$

Якщо при вимірюваннях існує можливість визначити систематичну погрішність і внести в результат виправлення на неї, то інтервалом невизначеності досить характеризувати тільки випадкову складову, як це показано на мал. 1 б. У цьому випадку ширина інтервалу, що містить погрішність, зменшується. Інтервал невизначеності істинного значення вимірюваної величини визначається вираженням

$$P(\tilde{x} - \Delta_c - \Delta_x \leq x \leq \tilde{x} - \Delta_c + \Delta_x) = P_0. \quad (3)$$

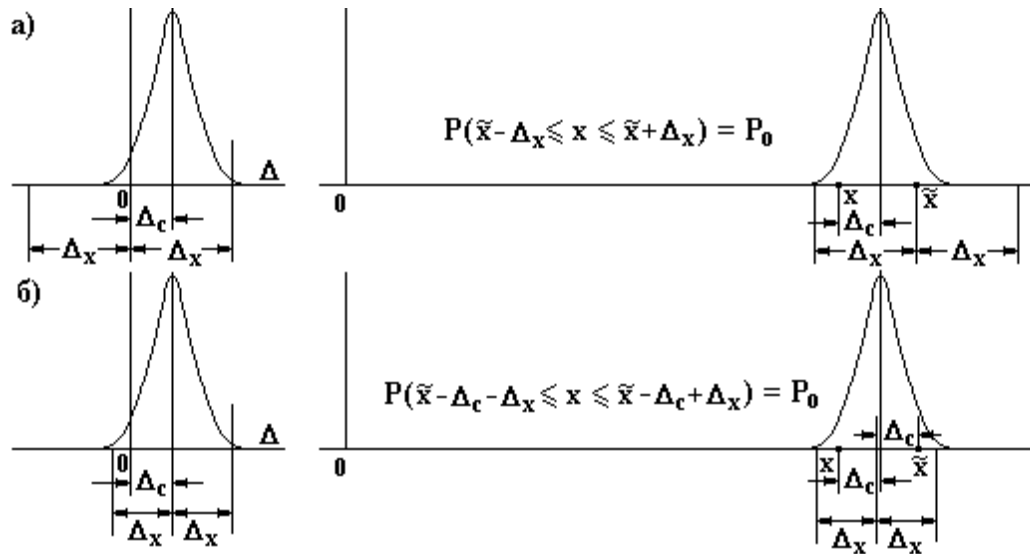


Рисунок 1 – Інтервали невизначеності погрішності (ліворуч) та істинного значення вимірюваної величини (праворуч).

Однак, точне визначення систематичної погрішності неможливо, і після її виключення завжди залишається невиключена частина систематичної погрішності. Якщо граничне значення модуля невиключеної систематичної погрішності позначити через Δ_c , то тоді й після введення виправлення на систематичну погрішність інтервал невизначеності результату вимірювання буде визначатися так, як показано на мал. 1 а, де в цьому випадку Δ_c - це граничне значення модуля невиключеної систематичної погрішності вимірювань, що входить у характеристику Δ_x загальної погрішності вимірювань.

Отже, якщо погрішності мають випадковий характер, то цьому інтервалу зіставляється імовірнісна міра P_0 , близька до одиниці (від 0.8 до 0.95). Саме таке трактування характеристики погрішності вимірювань утримується у визначенні терміна “*єдність вимірювань*”, що наведено вище в п. 1.1.

Повторимо ще раз, що зазначена інтервальна характеристика погрішності результату вимірювання є не що інше, як інтервальна характеристика залишкової невизначеності значення вимірюваної величини.

Характеристика погрішності Δ_x є основна характеристика якості результату вимірювання й залишкової невизначеності значення вимірюваної величини. Результат кожного вимірювання повинен супроводжуватися оцінкою цієї характеристики.

Форма вираження характеристики погрішності може бути двоякою: у вигляді граничного значення Δ_x абсолютної погрішності, або у вигляді граничного значення γ_x відносної погрішності, де $\gamma_x = \Delta_x/x$.

Відносна погрішність результату вимірювань (relative error)- відношення абсолютної погрішності результату вимірювань до істинного значення вимірюваної величини, виражається у відносних одиницях або у відсотках.

Оскільки істинне значення вимірюваної величини невідомо, відносна погрішність обчислюється стосовно результату вимірювання. Покажемо, що така заміна в більшості випадків припустима, тому що вона приводить до зміни значення погрішності на величину другого порядку малості в порівнянні з

$$\begin{aligned} \text{погрішністю: } \gamma_x &= \frac{\Delta x}{\tilde{x}} = \frac{\Delta x}{x + \Delta x} = \frac{\Delta x}{x} \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right)} = \frac{\Delta x}{x} \left(1 - \frac{\Delta x}{x} + \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 - \dots\right) = \\ &= \frac{\Delta x}{x} - \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \dots \approx \frac{\Delta x}{x} \end{aligned} \quad (4)$$

1.6 Запитання для самоконтролю.

1. Призначення метрології.
2. Які величини підлягають виміру в електротехніці.
3. Що таке засіб вимірювання.
4. Чим характеризується якість вимірювання.

2 ЗМІСТ ТА ЕТАПИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1 Основні етапи вимірювальних технологій

Надалі будемо розрізняти прямі й непрямі вимірювання.

Пряме вимірювання (direct measurement) - вимірювання, при якому результат вимірювання одержують безпосередньо з дослідних даних.

У деяких випадках пряме вимірювання величин виявляється неможливим або недоцільним. Тоді прибігають до *непрямих вимірювань*.

Непряме вимірювання - (indirect measurement) - визначення шуканого значення фізичної величини шляхом обчислень на підставі результатів прямих вимірювань інших фізичних величин, функціонально пов'язаних з вимірюваною величиною.

Першим етапом перед плануванням і виконанням будь-якої вимірювальної процедури є формалізація й складання моделі об'єкта вимірів і вимірюваної величини. Так, перед вимірюванням діаметра стрижня необхідно представити його, як круглий циліндр із зазначенням відхилень від круглості. При вимірюванні температури повітря в деякому об'ємі необхідно представити модель розподілу температури в цьому об'ємі й сформулювати вимірювану температуру, як вимірювану величину: середню по об'ємі, як мінімальну й максимальну, або як температуру в якій-небудь точці об'єму.

На наступному етапі організується взаємодія вимірювального інструмента з об'єктом вимірювань. Цей етап є найважливішим у процедурі сприйняття інформації від об'єкта. У ньому сконцентрована фізична, інформаційна й філософська сутність вимірювань, як пізнавального процесу. Саме тут стикаються дві протилежні сторони будь-якого пізнання: без контакту з об'єктом пізнання неможливо, але цей контакт із об'єктом спотворює його, що приводить до втрати частини інформації. Найбільш чіткою формалізацією такого дуалізму є відоме із квантової механіки співвідношення Гейзенберга між невизначеністю імпульсу Δp і невизначеністю координати Δx частки: $\Delta p \cdot \Delta x \approx h$, де h - постійна Планка.

У зв'язку з викладеним ця взаємодія повинна бути:

- досить “делікатною” стосовно об'єкта для того, щоб витягти максимум інформації при мінімальному перекручуванні об'єкта,
- вибіркою тільки стосовно вимірюваної величини й нечутливою стосовно інших властивостей і параметрів об'єкта,
- стабільною у часі,
- нечутливою до зовнішніх факторів, що заважають: кліматичним, механічним та іншим.

Сигнал вимірюваної величини, що впливає на чутливий елемент вимірювального інструмента, породжує реакцію цього інструмента у вигляді сигналу вимірювальної інформації, що повинен бути пов'язаний із сигналом вимірюваної величини взаємооднозначною стабільною функціональною залежністю.

Сигнал вимірювальної інформації, що утворюється у результаті взаємодії чутливої частини вимірювального інструмента з об'єктом, звичайно піддається перетворенням, таким, як фільтрація, посилення, ослаблення, нелінійному перетворенню, перетворенню в цифровий код з метою одержання сигналу, придатного для подальшої математичної обробки. Всі ці перетворення повинні бути взаємооднозначними, стабільними в часі, не залежними від дії зовнішніх факторів, що заважають.

Наступна математична обробка має на меті приведення сигналу вимірювальної інформації до розмірності вимірюваної величини й до такого розміру, щоб забезпечити впевнене зіставлення зі шкалою вимірюваної величини. Ця шкала формується завдяки виконанню спеціальної метрологічної процедури, що зв'язує її з державним еталоном, що зберігає одиницю вимірюваної величини.

Обов'язковим заключним етапом виміру є формування й представлення результату виміру й характеристик Δ_x погрішності цього результату, тобто характеристик залишкової невизначеності значення вимірюваної величини.

Процедура виконання непрямих вимірювань відрізняється від процедури прямих вимірювань додаванням етапу обчислення результату непрямого вимірювання $\tilde{w} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k)$, де $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k$ - результати прямих вимірювань. Зрозуміло, що тут перед плануванням і виконанням вимірювань важливо скласти більш докладну модель об'єкта вимірювань, що повинна містити ті самі співвідношення між параметрами об'єкта, які будуть

використані на етапі обчислення результатів непрямих вимірювань. І тут в обов'язковому порядку результат вимірювання повинен супроводжуватися повідомленням про характеристику погрішності Δ_w .

2.2 Приклади взаємодії датчиків з об'єктом вимірювань

Об'єкт вимірювання - електричне коло. Вимірюванню підлягає параметр цього кола, а саме, постійна напруга на його ділянці, опір якої дорівнює R_H (див. мал. 2 а). Еквівалентний опір іншої частини кола дорівнює $R_{\text{ц}}$. Істинне значення вимірюваної напруги, що було на опорі R_H до підключення вольтметра, дорівнює U_x . Засіб вимірювань - стрілочний вольтметр, власний опір якого зазначено в його технічній документації. Для розрахунку ефекту, виробленого взаємодією, будемо вважати, що інструментальна погрішність вольтметра дорівнює нулю.

$$U_x = E \frac{R_H}{R_H + R_{\text{ц}}}, \quad \tilde{U} = E \frac{R_H R_{\text{в}}}{R_H R_{\text{в}} + R_H R_{\text{ц}} + R_{\text{в}} R_{\text{ц}}}, \quad (5)$$

$$\Delta U = \tilde{U} - U_x = -E \frac{R_H^2 R_{\text{ц}}}{(R_H R_{\text{в}} + R_H R_{\text{ц}} + R_{\text{в}} R_{\text{ц}})(R_H + R_{\text{ц}})}. \quad (6)$$

У цих формулах $\tilde{U}$ - напруга, що утвориться після підключення вольтметра й виявляється менше вихідної істинної напруги в силу шунтування цієї ділянки ланцюга опором вольтметра, загальний струм у ланцюгу збільшується на значення струму, споживаного вольтметром, і тим самим об'єкт вимірювань змінюється. У результаті цього впливу виникає систематична погрішність, позначена тут через ΔU . Стосовно результату вимірювання ця погрішність обчислюється по формулі

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{\tilde{U}} = - \frac{R_H \cdot R_{\text{ц}}}{(R_H + R_{\text{ц}})} \cdot \frac{1}{R_{\text{в}}}. \quad (7)$$

Помноживши чисельник і знаменник отриманого виразу на $(\tilde{U}^2)$, побачимо, що відносна погрішність, викликана взаємодією вольтметра й кола, дорівнює відношенню енергій, тобто частці від розподілу енергії, споживаної вольтметром, на енергію, що розсіює об'єктом:

$$\gamma_U = - \frac{R_H \cdot R_{\text{ц}}}{(R_H + R_{\text{ц}}) \cdot (\tilde{U})^2} \cdot \frac{(\tilde{U})^2}{R_B} = - \frac{(\tilde{U})^2}{R_B} \cdot \frac{(\tilde{U})^2}{R_{\text{ц}B}}, \quad (8)$$

де $R_{\text{ц}B}$ - опір, “видиме” з боку вольтметра й рівне опору, утвореному паралельним з'єднанням опору навантаження R_H й опору кола $R_{\text{ц}}$.

У цьому випадку ця погрішність може бути майже повністю виключена шляхом введення виправлення. Залишкова погрішність буде визначатися точністю, з якою відомі значення величин, що входять у вираз для ΔU .

Відповідно до визначення, наведеного у п. 1.2, опір вольтметра R_B є одна з його метрологічних характеристик, оскільки впливає на погрішність результату вимірювань.

Об'єкт вимірювання - добре змішана рідина, у посудині (мал. 2 б).

Вимірюванню підлягає параметр об'єкта: температура рідини. Маса рідини m_1 , питома теплоємність c_1 , істинна температура t_x^o . Засіб вимірювань - ртутний термометр, який будемо вважати абсолютно точним. Його маса m_o , питома теплоємність занурюємої частини c_o . Власна температура термометра до його занурення в рідину дорівнює t_o^o , її значення може бути злічене зі шкали.

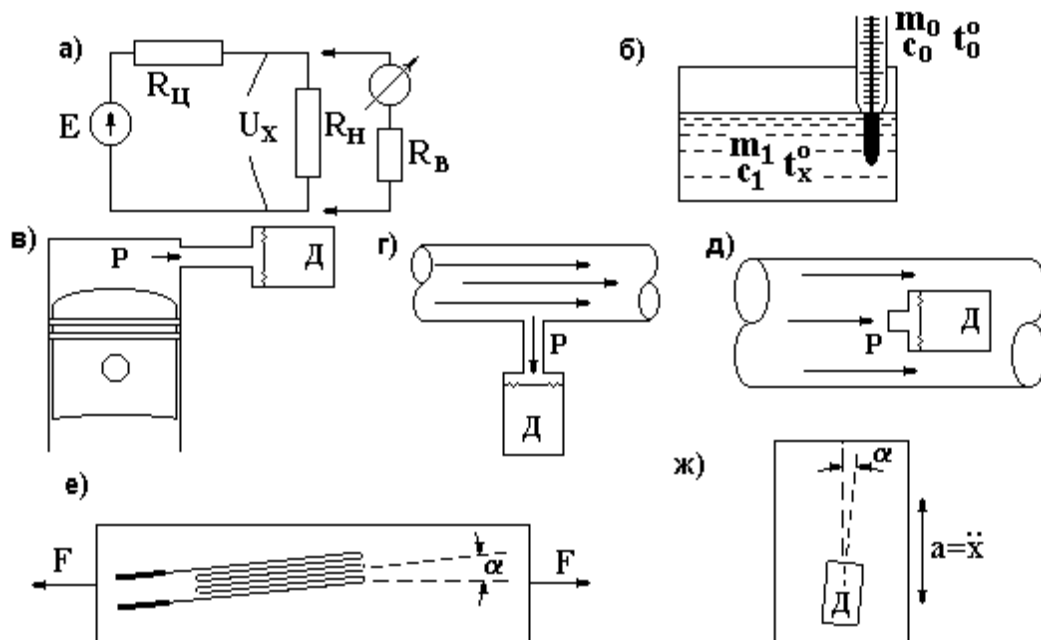


Рисунок 2 – Приклади взаємодії засобів вимірювань з об'єктом вимірювань.

Вважаємо, що теплообміну із зовнішнім середовищем немає. У такому випадку загальна кількість теплоти зберігається незмінною, і рівняння теплового балансу має вигляд:

$$t_o^o m_o c_o + t_x^o m_1 c_1 = \tilde{t}^o (m_o c_o + m_1 c_1), \quad (9)$$

де $\tilde{t}^o$ - стала температура рідини, а, отже, занурюємої частини термометра та результат вимірювання.

Зрозуміло, що якщо температура термометра була нижче істинної температури рідини, температура рідини знизиться й навпаки, підніметься в протилежному випадку. У результаті такої взаємодії термометра з об'єктом (рідиною) виникає систематична погрішність

$$\Delta t^o = \tilde{t}^o - t_x^o = - \frac{m_o c_o}{m_o c_o + m_1 c_1} (t_x^o - t_o^o). \quad (10)$$

Стосовно результату вимірювання ця погрішність обчислюється по формулі

$$\gamma_t = \frac{\Delta t^o}{\tilde{t}^o} = - \frac{m_o c_o (t_x^o - t_o^o)}{t_o^o m_o c_o + t_x^o m_1 c_1} = - \frac{Q_{TEPM}}{Q_\Sigma}, \quad (11)$$

тобто відносна погрішність вимірювання температури, викликана взаємодією засобу вимірювань з об'єктом, дорівнює частці від розподілу кількості теплоти (тобто енергії), необхідної для нагрівання (або охолодження) термометра до вимірюваної температури, на кількість загальної теплоти, що утримується в об'єкті й термометрі.

У цьому випадку ця погрішність систематична й може бути майже повністю виключена шляхом введення виправлення. Невиключений залишок погрішності буде визначатися точністю, з якої відомі величини, що входять у формулу для Δt^o .

Відповідно до визначення, наведеного у п. 1.2, маса й теплоємність занурюємої частини ртутного термометра є його метрологічними характеристиками, оскільки впливають на погрішність результату вимірювань.

Об'єкт вимірювання - циліндр двигуна внутрішнього згоряння (мал. 2 в). Параметр, що підлягає вимірюванню, - тиск газів усередині циліндра. Приєднання датчика Д с допомогою трубки приводить до збільшення об'єму камери згоряння й тим самим - до зміни об'єкта. Погрішність, що виникає при цьому взаємодії датчика з об'єктом, буде систематичною.

Об'єкт вимірювання - трубопровід з потоком рідини або газу (мал. 2 г, д). Параметр, що підлягає вимірюванню - тиск речовини, що транспортується. В одному випадку (мал. 2 г) погрішність, викликана небажаною взаємодією, буде негативною, в іншому (мал. 2 д) - позитивною.

Об'єкт вимірювання - механічна конструкція. Параметр, що підлягає вимірюванню - деформація ділянки конструкції. Засіб вимірювань (датчик) - дровотий тензорезистор. Принцип дії - зміна опору дроту, з якого виготовлений датчик, при його деформації в межах пружності. Для передачі деформації від об'єкта до датчика він приклеюється до об'єкта спеціальним нееластичним клеєм (мал. 2 е). Погрішність від взаємодії буде викликана наступними обставинами:

- незадовільною якістю приклеювання датчика,
- збільшенням жорсткості об'єкта за рахунок приклеювання до нього датчика,
- неточним позиціюванням датчика в напрямку вимірюваної деформації.

Погрішність, що виникає при цьому взаємодії датчика з об'єктом, буде систематичною, негативною.

Об'єкт вимірювання - транспортний засіб, механічна конструкція, будівельна споруда. Параметр, що підлягає вимірюванню - прискорення вібрацій у заданій точці. Засіб вимірювань - датчик прискорення, жорстко встановлений на об'єкті (мал. 2 ж). Погрішність буде викликана наступними обставинами:

- недостатня жорсткість кріплення датчика до об'єкта, внаслідок чого прискорення вібропересувань об'єкта передається до датчика не повністю,
- збільшенням маси об'єкта на величину маси датчика, внаслідок чого змінюється частота власних коливань об'єкта й амплітуда віброприскорень,
- неточним позиціюванням датчика в напрямку вимірюваних прискорень.

Для обмеження розкиду жорсткості кріплення датчика прискорень до об'єкта в технічній документації на подібні датчики повинне повідомлятися значення зусилля загвинчування гвинтів, що кріпляться (при гвинтовому кріпленні). Забезпечення заданого зусилля кріплення датчика здійснюється за

рахунок застосування динамометра або ключів, постачених пристроєм дозування зусилля.

Для оцінки ступеня впливу маси датчика на об'єкт вимірювань у технічній документації повинне бути наведене значення маси датчика із зазначенням меж припущених відхилень, від номінального значення, як однієї з метрологічних характеристик, що зумовлюють ступінь взаємодії з об'єктом і відповідну погрішність.

2.3 Запитання для самоконтролю.

1. Назвіть етапи виконання вимірювання.
2. Як взаємодіють елементи в процесі вимірювання.

3 МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ

3.1 Загальні положення

Інструментальна погрішність результатів вимірювань цілком визначається властивостями засобів вимірювань. Характеристики цих властивостей називаються *метрологічними характеристиками* засобів вимірювань.

У стандарті ДСТ 8.009-84 “Державна система забезпечення єдності вимірювань, нормування й використання метрологічних характеристик засобів вимірювань” приводиться визначення метрологічних характеристик та їхній перелік, загальний підхід до вибору номенклатури метрологічних характеристик, а також способи встановлення норм на них і приклади застосування.

У технічній документації на засоби вимірювань варто приводити перелік метрологічних характеристик і норми на них, виходячи з того, що метрологічні характеристики повинні дозволяти

- прогнозувати характеристики погрішності результатів вимірювань - при придбанні засобу вимірювань або при плануванні вимірювань,
- оцінювати характеристики погрішності результатів вимірювань - при виконанні вимірювань у реальних умовах експлуатації,
- контролювати схоронність метрологічних характеристик засобів вимірювань при їхніх випробуваннях із прийнятними витратами без втрати вірогідності контролю.

Норми на метрологічні характеристики засобів вимірювань встановлюються з метою забезпечення гарантій їхнього дотримання й схоронності на момент придбання засобу вимірювань, у період їхньої експлуатації й зберігання. У відповідності зі стандартом ДСТ 8.009-84 ці норми повідомляються користувачеві в нормативних документах виду технічних умов (ТУ) або технічних описів (ТЕ), а також у рекламній документації (вибірково) у вигляді меж значень метрологічних характеристик, що допускаються. Гарантії схоронності метрологічних характеристик забезпечуються виробником і контролюючими державними й відомчими метрологічними органами шляхом метрологічних випробувань засобів вимірювань.

Метрологічні характеристики діляться на наступні групи:

- характеристики погрішності засобів вимірювань,
- характеристики перетворення сигналів вимірюваних величин і сигналів вимірювальної інформації,
- характеристики взаємодії з об'єктом і зовнішніми засобами вимірювань,
- інші метрологічні характеристики, тобто метрологічні характеристики, які відповідно до ДСТ 8.009-84 при технічній необхідності можуть встановлюватися додатково понад зазначених в цьому стандарті.

3.2 Характеристики погрішності засобів вимірювань

Поняття, терміни й визначення, наведені в цьому й наступному пунктах, відповідають ДСТ 8.009-84 і МІ 2247-93 “Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Основні терміни й визначення”.

Для засобів вимірювань нормуються характеристики основної й додаткової погрішностей. Нагадаємо, що основна погрішність - це погрішність засобу вимірювань у нормальних умовах експлуатації.

При відсутності або зневажливої малості випадкової складової погрішності встановлюється межа основної допущеної погрішності, яка може бути представлена у вигляді абсолютної, або відносної погрішності, або як приведена до *деякого значення, що* нормується, (fiducial value) вимірюваної величини.

При наявності істотної випадкової складової погрішності норми на характеристики систематичної й випадкової складових встановлюються роздільно:

- межа складової допущеної систематичної погрішності,
- межа припущеного середньоквадратичного значення випадкової складової погрішності.

Допускається встановлювати характеристику погрішності, що містить у собі обидві складові: систематичну й випадкову. Такою характеристикою є інтервал, заданий нижньою Δ_H й верхньою Δ_B межами, між якими містяться

значення основної погрішності з імовірністю, не меншої заданої ймовірності P_0 , рівної звичайно $0,8 \div 0,95$, тобто

$$P(\Delta_H \leq \varepsilon \leq \Delta_B) \geq P_0. \quad (12)$$

Як правило, ці межі симетричні щодо нуля, тобто $\Delta_H = -\Delta_B = -\Delta_X$.

При залежності погрішності засобу вимірювань від вимірюваної величини норми на характеристики погрішності можуть бути виражені у вигляді функції або графіка.

Норми на характеристики додаткової погрішності встановлюються у вигляді меж припущених змін характеристик, основної погрішності, викликаних відхиленням впливаючих величин, від нормальних значень. Ці межі вказуються в частках від норм на відповідні характеристики основної погрішності по кожній з впливаючих величин роздільно.

При незначній додатковій погрішності або на вимогу користувача замість зазначення характеристик основної погрішності можуть бути зазначені характеристики погрішності засобу вимірювань для розширеної області зміни впливаючих величин аж до області, що відповідає робочим умовам застосування (в англійських документах для позначення робочих умов застосування засобів вимірювань використовується термін “normal conditions”). У таких випадках зазначення характеристик додаткової погрішності виявляється зайвим. Але при цьому варто мати на увазі, що експериментальний контроль характеристик погрішності, встановлених для робочих умов, сильно ускладнюється, оскільки для цього доведеться штучно створювати зазначені умови шляхом контрольованого відтворення спільної дії впливаючих величин у широкій області значень й у достатньому об'ємі, що вимагається для розміщення в ньому засобу вимірювань.

До характеристик погрішності засобів вимірювань належать метрологічні характеристики, що відбивають погрішності відлічування результату вимірювання або його округлень при представленні результатів вимірювань або значень фізичних величин у цифровому коді.

Такими метрологічними характеристиками є:

- *ціна найменшого ділення шкали,*
- *ціна молодшого розряду вихідного коду АЦП або індикатора цифрового приладу,*

- значення найменшої ступені фізичної величини, яка відтворюється багатозначними мірами, або величини, формованої на виході цифроаналогового перетворювача (ЦАП).

3.3 Характеристики перетворення вимірюваної величини й сигналів вимірювальної інформації

У документації на вимірювальний перетворювач повинні бути зазначені:

- *номінальна функція перетворення* (інакше - *номінальна статична характеристика перетворення*) вимірюваної величини $f(x)$,
- *динамічні характеристики*, що описують перетворення сигналів, які змінюються в часі, вимірюваної величини або сигналів вимірювальної інформації.

Форма представлення номінальних характеристик - функція, графік або таблиця. Якщо номінальна функція перетворення лінійна й проходить через початок координат, вказується значення номінального коефіцієнта перетворення.

Межі допущених відхилень реальної функції перетворення від номінальної не нормуються, оскільки нормами на ці відхилення, по суті справи, є норми, які встановлені на характеристики погрішності.

Динамічні характеристики вказуються в документації на засоби вимірювань, призначені для вимірювань у динамічному режимі або здатні бути використаними в такому режимі. Гранично припущений розкид динамічних характеристик на множині екземплярів засобів вимірювань обмежується за допомогою встановлення граничних динамічних характеристик (верхньої й нижньої).

Прикладами динамічних характеристик можуть служити *імпульсна перехідна характеристика (вагарня функція) $k(t)$* і *комплексна частотна характеристика $K(j\omega)$* . Ці характеристики називаються *повними динамічними характеристиками*. Вони взаємооднозначно пов'язані перетворенням Фур'є:

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} k(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad k(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (13)$$

До повних динамічних характеристик відносяться також

- *передатна функція*, яка утворюється із $K(j\omega)$ простою заміною $j\omega = p$,

- амплітудно-частотна характеристика $A(\omega)$ у комплекті з фазо-частотною характеристикою $\varphi(\omega)$,
- перехідна характеристика $H(t)$.

Фізичний зміст імпульсної перехідної характеристики - це вихідний сигнал лінійного аналогового перетворювача, що виникає, як реакція перетворювача на вхідний сигнал у вигляді Δ - функції, тобто дуже короткого імпульсу, потужність якого достатня для одержання помітного сигналу на виході.

Перехідна характеристика - це вихідний сигнал лінійного аналогового перетворювача, що виникає, як реакція перетворювача на вхідний сигнал у вигляді одиничного стрибка.

$$H(t) = \int_0^t k(\tau) \cdot d\tau, \quad k(t) = \frac{dH(t)}{dt}. \quad (14)$$

Амплітудно-частотна характеристика - це залежне від частоти відношення амплітуди синусоїдального вихідного сигналу до амплітуди вхідного синусоїдального сигналу, що викликав його (тобто коефіцієнт підсилення амплітуди).

Фазо-частотна характеристика - це залежний від частоти зсув фази вихідного синусоїдального сигналу стосовно фази вхідного синусоїдального сигналу, що викликав його.

$$A(j\omega) = |K(j\omega)|, \quad K(j\omega) = A(j\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}.$$

Комплексна частотна характеристика реального засобу вимірювань являє собою відношення двох поліномів від $j\omega$, причому ступінь полінома чисельника не перевершує ступеня полінома знаменника.

На мал. 3 як приклади представлені графіки деяких з перерахованих характеристик першого й другого порядку, чому відповідають індекси в позначень цих характеристик. Перехідна характеристика й імпульсна перехідна характеристики другого порядку мають коливальний характер, амплітудно-частотна характеристика може мати максимум, а її фазо-частотна характеристика зі збільшенням частоти прагне до $(-\Delta/2)$. Фазо-частотні характеристики всіх фізично реалізованих динамічних ланок негативні. Це говорить про те, що перетворення величин, що змінюються в часі, супроводжується запізнюванням, різним на різних частотах.

В ряді випадків достатніми для застосування виявляються менш докладні часткові динамічні характеристики, такі як час реакції t_p засобу вимірювань

(див. мал. 3) і граничні значення частот, між якими амплітудно-частотна характеристика відхиляється від свого номінального значення не більш, ніж на задану величину. На мал. 3 показана лише верхня частота ω_B частотної смуги.

Час реакції засобу вимірювань (response time) - інтервал часу між моментом стрибкоподібної зміни сигналу на вході засобу вимірювань і моментом, починаючи з якого вихідний сигнал відрізняється від свого сталого значення не більш, ніж на задану величину (наприклад, не більш, ніж на межу допущеної основної погрішності).

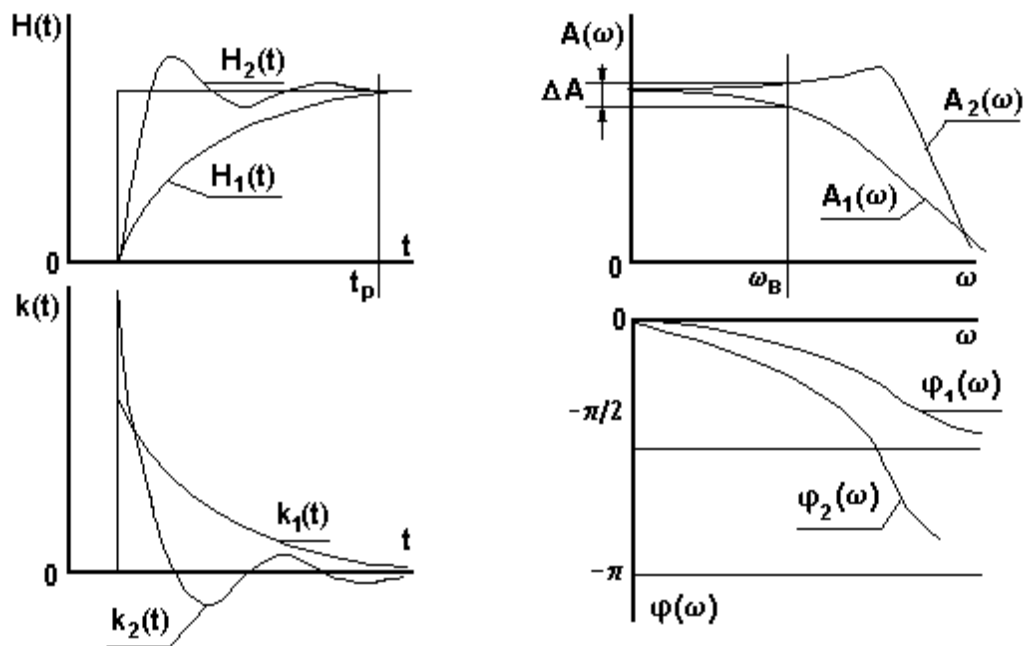


Рисунок 3 – Повні й часткові динамічні характеристики.

Динамічними характеристиками цифрових засобів вимірювань є:

- *максимальна частота вимірювань (число вимірювань в одиницю часу),*
- *тривалість циклу одного перетворення.*
- *погрішність датування відліків, у якості якої в більшості випадків використовується тривалість циклу перетворення.*

Динамічні характеристики цифроаналогових перетворювачів і програмно керованих калібраторів:

- *максимальний темп зміни вхідного коду за умови забезпечення встановлення значення вихідної величини з нормованою точністю,*
- *час реакції на зміну вхідного коду.*

При керуванні цифровим вимірювальним приладом, аналого-цифровим перетворювачем, ЦАП або калібратором від комп'ютера значення

перерахованих характеристик повинні вказуватися з урахуванням швидкодії елементів використовуваного інтерфейсу управляючих програм і комп'ютера.

3.4 Характеристики взаємодії з об'єктом і зовнішніми засобами вимірювань

Характеристиками властивостей засобу вимірювань, що відбивають їхню здатність до взаємодії із зовнішніми об'єктами або пристроями, є:

- *діапазон зміни вимірюваної величини* на вході засобу вимірювань (*діапазон вимірювання*),
- *вхідний опір* (або вхідний імпеданс, або сила споживаного від об'єкта струму) - для засобів вимірювань сили струму, напруги, потужності, електричній енергії, вимірювальних перетворювачів з електричним вхідним сигналом),
- *вихідний опір* (або вихідний імпеданс) - для аналогових вимірювальних перетворювачів з електричним вихідним сигналом,
- інші характеристики засобів вимірювань, що відбивають їхню здатність впливати на об'єкт вимірювання, на інформативні параметри сигналу вимірюваної величини,
- вид вихідного коду, кількість розрядів вихідного коду аналого-цифрових перетворювачів і цифрових приладів, постачених пристроями зв'язку з комп'ютером (процесором),
- вид вхідного коду, кількість розрядів вхідного коду, ціна одиниці молодшого розряду вхідного коду ЦАП і кодокеруємих калібраторів.

3.5 Метрологічні характеристики аналогових вимірювальних приладів

Метрологічні характеристики, нормовані для аналогових вимірювальних приладів:

- *діапазон зміни вимірюваної величини*,
- *межа допущеної основної приведенної погрішності*, виражається в %,
- *власний опір або імпеданс* (нормується тільки для електровимірювальних приладів),

- межа допущеної додаткової погрішності, виражається в частках (звичайно 0.5 або 1.0) від межі допущеної основної приведенної погрішності, і нормується для кожної впливаючої величини роздільно.

Основна погрішність аналогових вимірювальних приладів нормується без поділу на мультиплікативну й аддитивну складові. Випадкова складова погрішності подібних приладів практично відсутня, якщо не вважати можливого випадкового характеру погрішності від тертя рухливих частин.

Наведена погрішність нормується з метою позбутися від розміру вимірюваної величини. Абсолютна погрішність Δ приводиться до деякого умовного нормуючого значення вимірюваної $x_{\text{нрм}}$ величини, і для неї у всьому діапазоні зміни вимірюваної величини встановлюється межа припущених значень

$$\left| \frac{\Delta}{x_{\text{нрм}}} \right| \cdot 100\% \leq \gamma_{\text{прив}}, \quad (15)$$

звідки треба, що основна абсолютна погрішність засобу вимірювань, придатного до застосування, у будь-якій точці діапазону вимірювань повинна задовольняти нерівності

$$|\Delta| \leq \frac{\gamma_{\text{прив}}}{100} \cdot |x_{\text{нрм}}| \quad (16)$$

Залежно від типу приладу, діапазону значень вимірюваних величин, від принципу дії й від состава погрішностей нормуючі значення можуть бути обрані із числа наступних:

$x_{\text{нрм}} = |x_{\text{max}}|$ (модуль максимального значення в діапазоні вимірювання),

$x_{\text{нрм}} = |x|$ (модуль поточного значення вимірюваної величини),

$x_{\text{нрм}} = |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|$ (ширина діапазону значень вимірюваної величини),

Аналоговим вимірювальним приладам з безпосереднім відліком присвоюється клас точності (class index), що позначається числом, рівним межі допущеної основної приведенної погрішності $\gamma_{\text{прив}}$. Стандартом ДСТ 8.401 “Державна система забезпечення єдності вимірювань. Класи точності засобів вимірювань. Загальні вимоги” пропонується вибирати значення $\gamma_{\text{прив}}$ з наступного ряду чисел:

$1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; (1,6 \cdot 10^n); 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; (3 \cdot 10^n); 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n$, де $n = 1, 0, -1, -2, \dots$. Значення, зазначені в дужках, не рекомендовані й використовуються як виняток. Позначення класу точності приладу звичайно зображується на шкалі або лицьовій панелі приладу різним образом залежно від прийнятого для приладів даного типу нормуючого значення:

1.5 - позначення класу точності приладу при $x_{\text{нрм}} = |x_{\text{max}}|$ (нормується при переважаючій перевазі аддитивної погрішності над мультиплікативною),

1.5 - позначення класу точності приладу при $x_{\text{нрм}} = |x|$ (нормується при малості аддитивної погрішності в порівнянні з мультиплікативною),

|1.5| - позначення класу точності приладу при $x_{\text{нрм}} = |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|$ (нормується, коли нульове значення вимірюваної величини перебуває або усередині діапазону, або поза ним).

1.5 - позначення класу точності приладу (як правило, аналогового омметра), чисельно рівне вираженому в % відношенню максимального в діапазоні вимірювання значення погрішності в міліметрах довжини шкали до довжини всієї шкали в міліметрах.

Єдина динамічна характеристика, яку має сенс нормувати для аналогових приладів, це час установлення показань, тобто час реакції, що для всіх подібних приладів дорівнює, за замовчуванням, приблизно 1 с і спеціально не вказується.

3.6 Метрологічні характеристики цифрових вимірювальних приладів

Цифрові вимірювальні прилади, як правило, електронні, виконують вимірювання в дискретні моменти часу по сигналу запуску, що може періодично вироблятися в самому приладі, подаватися тим або іншим способом вручну або від зовнішніх пристроїв, наприклад, від комп'ютера. Індикація результату виконується в цифровому виді. Звичайно цифрові прилади мають можливість обміну інформацією з комп'ютером і тоді результат вимірювання передається на пам'ять комп'ютера також у цифровому виді. У зв'язку із цим неминуче округлення результатів. Абсолютна погрішність, що виникає від округлення, є аддитивною і не перевищує ціни одиниці молодшого розряду вихідного коду або цифрового табло приладу.

У більшості випадків при нормуванні характеристик погрішності цифрових приладів ураховуються обидві складової погрішності: мультиплікативна й аддитивна. Тому для цифрових приладів основна *відносна* погрішність нормується лінійною функцією від вимірюваної величини. Оскільки нормуюча функція лінійна, для її представлення досить двох чисел, які є коефіцієнтами *двочленної нормуючої формули*. Коефіцієнти двочленної формули виражаються у відсотках.

$$\begin{aligned}\gamma_{\text{инст}} &= \frac{\Delta K}{K} 100\% + \frac{\varepsilon}{x} 100\% = \frac{\Delta K}{K} 100\% + \frac{\varepsilon}{|x_{\max}|} 100\% + \frac{\varepsilon}{x} 100\% - \frac{\varepsilon}{|x_{\max}|} 100\% = \\ &= \left(\frac{\Delta K}{K} + \frac{\varepsilon}{|x_{\max}|} \right) \cdot 100\% + \frac{\varepsilon}{|x_{\max}|} \left(\frac{|x_{\max}|}{x} - 1 \right) \cdot 100\% .\end{aligned}\quad (17)$$

Таким чином, якщо будуть встановлені такі значення $c > 0$ й $d > 0$, що

$$\left(\left| \frac{\Delta K}{K} \right| + \frac{|\varepsilon|}{|x_{\max}|} \right) \cdot 100\% \leq c, \quad \frac{|\varepsilon|}{|x_{\max}|} \cdot 100\% \leq d, \quad (18)$$

то межі допущеної основної відносної погрішності, можуть бути нормовані відповідно до ДСТ 8.401 *двочленною формулою*:

$$|\gamma_{\text{инст}}| \leq \left[c + d \left(\frac{|x_{\max}|}{|x|} - 1 \right) \right] \%, \quad (19)$$

у якій значення коефіцієнтів c й d вибираються з ряду чисел, наведеного в попередньому пункті (див. також п. 3.1).

Звернемося знову до абсолютної інструментальної погрішності:

$$\Delta_{\text{инст}} = \frac{\gamma_{\text{инст}} \cdot x}{100} = \frac{\Delta K}{K} \cdot x + \varepsilon. \quad (20)$$

З останніх двох виразів виходить, що допущені значення абсолютної інструментальної погрішності цифрового приладу, як і граничні значення погрішностей результатів вимірювань можуть бути обмежені двома прямими лініями, показаними на мал. 4. На початку діапазону вимірювання при $x = 0$ погрішність визначається тільки аддитивною складовою ε , а d є не що інше, як межа допущеної приведеної аддитивної погрішності. Наприкінці діапазону при $x = x_{\max}$, як це виходить із двочленної формули, межею допущеної приведеної погрішності є *коефіцієнт c*.

Метрологічні характеристики, нормовані для цифрових приладів:

- діапазон вимірювання,
- межі допущеної основної відносної погрішності нормуються двочленною формулою (19) шляхом завдання коефіцієнтів c і d ,
- вхідний опір (імпеданс), нормується тільки для електровимірювальних приладів,
- кількість розрядів, що представляються на індикацію,
- ціна одиниці молодшого розряду індикації результатів вимірювань,
- вид, число розрядів і ціна одиниці молодшого розряду вихідного коду, нормується у випадках наявності зв'язку з комп'ютером або друкувальним пристроєм,
- межі додаткової допущеної погрішності,
- максимальна частота вимірювань (представляється в $1/c$) або тривалість циклу одного перетворення (представляється в c),

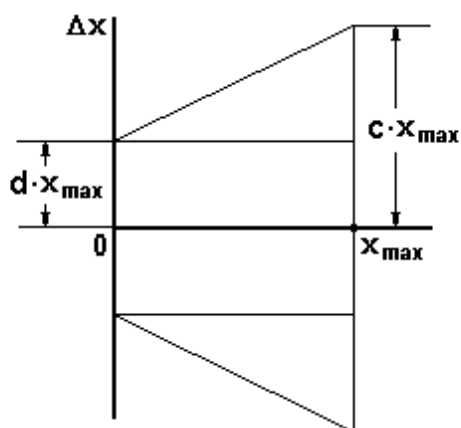


Рисунок 4 – Межі допущеної основної абсолютної погрішності лінійних засобів вимірювань.

- погрішність датування відліків,
- максимальна швидкість обміну інформацією із зовнішніми пристроями, нормується у випадках, коли такий зв'язок передбачений.

Клас точності цифрових приладів відповідно до ДСТ 8.401 позначається двома цифрами, рівними коефіцієнтам двочленної формули, розділеними косою рисою: c/d .

Якщо цифровий прилад призначений для виконання вимірювань у динамічному режимі із записом результатів у пристрій пам'яті або комп'ютер, а на його вході включений аналоговий інерційний перетворювач (наприклад, фільтр), то нормуються динамічні характеристики цього перетворювача.

Точно так само нормуються метрологічні характеристики вимірювальних каналів ІВС, які містять аналогові інерційні перетворювачі й закінчуються аналого-цифровим перетворенням. Для них нормування динамічних характеристик аналогової частини є обов'язковим. Для цифрових приладів і вимірювальних каналів ІВС звичайно досить нормувати часткові динамічні характеристики, такі, як час реакції або межі частотної смуги.

Норми на максимальну частоту вимірювань, тривалість циклу перетворення й на погрішність датування відліків у вимірювальному каналі ІВС повинні встановлюватися з урахуванням швидкодії системи обміну інформації в ІВС і дисципліни цього обміну.

Виробник цифрових приладів й ІВС вправі нормувати погрішності засобів вимірювань, що випускають, не двочленною формулою, а межею допущеної основної наведеної погрішності.

3.7 Метрологічні характеристики аналогових вимірювальних перетворювачів

1*. Для лінійних аналогових вимірювальних перетворювачів нормуються наступні метрологічні характеристики:

- діапазон зміни вхідного сигналу вимірювальної інформації,
- коефіцієнт перетворення, представляється своїм номінальним значенням,
- вхідний опір або імпеданс із зазначенням номінального значення й меж допущених відхилень від нього,
- вихідний опір або імпеданс із зазначенням номінального значення й меж допущених відхилень від нього,
- межі основної відносної погрішності у вигляді двочленної формули (19) за допомогою зазначення значень коефіцієнтів c й d ; при наявності істотної випадкової складової погрішності виконується роздільне нормування характеристик систематичної й випадкової складових,
- межі допущеної додаткової погрішності (по кожній з впливаючих величин роздільно),
- одна з повних динамічних характеристик, що відповідають призначенню перетворювача, в обґрунтованих випадках допускається нормувати часткові динамічні характеристики із зазначенням номінальних значень і меж допущених відхилень від них.

Відповідно до ДСТ 8.009 випадкова складова вважається істотною, якщо її середньоквадратичне значення становить не менш 10% від загальної погрішності.

2*. Для перетворювачів з незначною нелінійністю, що розглядається, як причина *погрішності від нелінійності*, мультиплікативна погрішність виділена бути не може. Тому для таких перетворювачів основна погрішність нормується

межею допущеної основної приведенної погрішності, як для аналогових приладів. Всі інші метрологічні характеристики ті ж, що й у лінійних аналогових перетворювачів. Помітимо тільки, що в цьому випадку через нелінійність перетворювачів нормуються часткові динамічні характеристики, найчастіше час реакції.

3*. Для перетворювачів з істотною нелінійністю нормуються ті ж характеристики, що й у попередньому випадку, за винятком коефіцієнта перетворення й повних динамічних характеристик, які не застосовні до нелінійних перетворювачів.

Замість коефіцієнта перетворення вказується номінальна функція перетворення у вигляді функціональної залежності, графіка або таблиці. Відхилення реальних функцій перетворення від номінальної враховуються в складі основної погрішності, нормованої, як у попередньому випадку, у формі приведенної погрішності.

В якості динамічної характеристики нормується, як правило, часткова динамічна характеристика - час реакції.

3.8 Метрологічні характеристики аналого-цифрових і цифроаналогових вимірювальних перетворювачів

1*. Для аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) нормуються наступні метрологічні характеристики:

- діапазон зміни вхідного сигналу вимірювальної інформації,
- для лінійних АЦП – межі допущеної основної відносної погрішності нормуються двочленною формулою (19) шляхом завдання *коефіцієнтів* c і d ; при наявності істотної випадкової складової погрішності виконується роздільне нормування характеристик систематичної й випадкової складових,
- для АЦП із заданою нелінійною функціональною залежністю вихідного коду від вхідної напруги (струму) – межа допущеної основної наведеної погрішності,
- вхідний опір (імпеданс),
- вид вихідного коду й кількість розрядів,
- ціна одиниці молодшого розряду вихідного коду,
- межі допущеної додаткової погрішності,

- максимальна частота вимірювань (представляється в $1/c$) або тривалість циклу одного перетворення (представляється в c), вказуються з урахуванням швидкодії пристроїв зв'язку з комп'ютером і дисципліни організації цього зв'язку,

- погрішність датування відліків, вказується з урахуванням швидкодії пристроїв зв'язку з комп'ютером і дисципліни організації цього зв'язку,

Для АЦП із заданою нелінійною функціональною залежністю вихідного коду від вхідної напруги (струму), вказується номінальна функція перетворення.

Відповідно до ДСТ 8.401 клас точності лінійного АЦП позначається двома цифрами, рівними коефіцієнтам двочленної формули, розділеними косою рисою: c/d . Клас точності АЦП із заданою нелінійною функціональною залежністю вихідного коду від вхідної напруги (струму) позначається однією цифрою, рівної межі допущеної приведенної погрішності.

Виробник АЦП вправі нормувати основну приведену погрішність одним числом.

Якщо на вході АЦП включений аналоговий інерційний перетворювач (наприклад, фільтр), то нормуються динамічні характеристики цього перетворювача, найчастіше, час реакції.

2*. Для цифроаналогових перетворювачів (ЦАП) нормуються наступні метрологічні характеристики:

- вид вхідного коду, діапазон його можливих значень, номінальна ціна одиниці молодшого розряду вхідного коду,

- діапазон зміни величини на виході ЦАП, що відповідає діапазону значень вхідного коду,

- вихідний опір або вихідний імпеданс, указується номінальне значення й допущені межі відхилення від нього,

- межі допущеної основної відносної погрішності нормуються двочленною формулою (19) шляхом завдання коефіцієнтів c и d ; при наявності істотної випадкової складової погрішності виконується роздільне нормування характеристик систематичної й випадкової складових,

- межі додаткових погрішностей, що допускаються - для кожної впливаючої величини нормуються роздільно,

- час реакції вихідного сигналу на зміну вхідного коду на величину, рівну 80% від діапазону значень цього коду.

У випадках, коли ЦАП проектується, як нелінійний, вказується номінальна функція перетворення.

Основна погрішність у цьому випадку нормується межею допущеної наведеної погрішності. Вона містить у собі можливі відхилення реальних функцій перетворення конкретних екземплярів ЦАП.

3.9 Метрологічні характеристики однозначних і багатозначних мір

1*. Для однозначних мір нормуються наступні метрологічні характеристики:

- номінальне значення величини, відтворене мірою,
- межа допущеної основної відносної погрішності відтворення значення величини,
- дія величин, що впливають на значення відтвореної величини, нормується одним зі способів:
 - межами додаткових погрішностей, що допускаються - по кожній впливаючій величині роздільно,
 - функціональною залежністю значення відтвореної величини від величин, що впливають - для введення виправлень.

2*. Для багатозначних мір нормуються наступні метрологічні характеристики:

- діапазон значень величини, відтворених мірою,
- значення найменшої ступені величини, відтвореною мірою,
- вихідний опір або імпеданс - для мір, що відтворюють електричні величини, або характеристика взаємодії міри із пристроєм, для якого відтворюється величина,
- межі допущеної основної відносної погрішності відтворення значень величини, нормуються двочленною формулою (19) шляхом завдання коефіцієнтів s и d , при наявності істотної випадкової складової погрішності виконується роздільне нормування характеристик систематичної й випадкової складових,
- межі допущеної додаткової погрішності нормуються по кожній величині роздільно,

- для мір, керованих дистанційно (наприклад, від комп'ютера) вказується вид вхідного коду, діапазон його можливих значень, номінальна ціна одиниці молодшого розряду вхідного коду, час реакції вихідного сигналу на зміну вхідного коду на величину, рівну 80% від діапазону значень цього коду.

3.10 Запитання для самоконтролю.

1. Якими нормативними документами нормуються метрологічні показники.
2. Розшифруйте поняття – метрологічна погрішність.
3. що таке ціна поділки шкали.
4. Метрологічні характеристики аналогових вимірювальних приладів та перетворювачів.
5. Метрологічні характеристики цифрових вимірювальних приладів.
6. Метрологічні характеристики однозначних і багатозначних мір

4 АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ. ПРИНЦИПИ ДІЇ, ВЛАСТИВОСТІ Й ЗАСТОСУВАННЯ

4.1 Загальні характеристики

Аналогові вимірювальні прилади, як правило, забезпечують виконання прямих вимірювань, відлік результату вимірювань виробляється по шкалі. Режим вимірювань, виконуваних аналоговими засобами вимірювань - статичний. Більшість аналогових вимірювальних приладів - стрілочні з нерухомою шкалою й рухливою стрілкою, переміщення якої (поворот або лінійне переміщення) щодо шкали функціонально взаємооднозначно зв'язано зі значенням вимірюваної величини.

Інші різновиди аналогових вимірювальних приладів:

- с нерухомою стрілкою або іншим покажчиком і рухливою шкалою,
- с лінійним індикатором у вигляді сполученої зі шкалою смуги, довжина якої функціонально взаємно однозначно зв'язана зі значенням вимірюваної величини (наприклад, ртутний термометр).

У стрілочному приладі вимірювана величина перетвориться в кут повороту стрілки (або в переміщення шкали) з деякою погрішністю ε_1 . Зворотне перетворення й суміщення зі шкалою здійснюється за рахунок того, що оцінки на шкалі наносяться відповідно до номінальної зворотної функції $f^{-1}(\alpha)$ й відцифруються в одиницях вимірюваної величини. Перенос розмірів вимірюваної величини на шкалу виконується шляхом подачі на вхід приладу зразкових значень від спеціального джерела (калібратора), пов'язаного з державним еталоном через перевірочну схему. Ці дії також супроводжуються погрішностями, які позначені, як ε_2 .

В конструкторських і нормативних документах на аналогові вимірювальні прилади встановлюються наступні метрологічні характеристики:

- діапазон зміни вимірюваної величини,
- межа допущеної основної абсолютної інструментальної погрішності Δ_{don} , або (набагато частіше) межа допущеної основної приведеної інструментальної погрішності $\gamma_{прив}$ (п. 3.4),

- межі допущених додаткових погрішностей (п. 3.4), викликуваних відхиленням кожної з впливаючих величин від значень, що відповідають нормальним умовам,

- характеристики параметрів, що впливають на погрішність e_2 , викликану взаємодією приладу з об'єктом вимірювань (див. п. 2.2); для вольтметрів - це опір або струм повного відхилення стрілки, для амперметрів - це власний опір амперметра.

Норми на зазначені метрологічні характеристики встановлюються в такий спосіб.

Норми на межу допущеної основної абсолютної погрішності установлюються в одиницях вимірюваної величини числом, що містить не більше двох значущих цифр.

Норми на межу допуску основний приведеної, у тому числі, відносній погрішності встановлюються числом, вираженим у відсотках, з ряду чисел за ДСТ 8.401, представленого в п. 3.5.

Норми на межу допущеної додаткової погрішності установлюються, як на доповнення до межі основної (абсолютної або приведеної) погрішності в наступних частках від межі основної погрішності:

- для додаткової погрішності від температури навколишнього середовища - на половину або на цілу межу основної погрішності при відхиленні температури від нормального значення на кожні 10 град.,

- для інших впливаючих величин - на половину або на цілу межу основної погрішності при відхиленні кожної впливаючої величини (п. 1.2) від нормального значення на весь діапазон зміни кожної впливаючої величини у робочих умовах застосування приладу.

Норми на параметри, що впливають на погрішність e_2 , установлюються зазначенням номінального значення й меж допущених відхилень від цього значення.

Окрім записів у нормативній або супровідній документації деякі характеристики й властивості аналогових вимірювальних приладів вказуються на їхніх шкалах або корпусах відповідно до ДСТ 23217.

Позначення системи приладу:



- прилад магнітоелектричної системи,



- прилад магнітоелектричної системи з випрямлячем,

-  - прилад електродинамічної системи,
-  - прилад феродинамічної системи,
-  - прилад електромагнітної системи,
-  - прилад електростатичної системи,
-  - прилад індукційної системи.

Позначення класів точності приладу (див. п. 3.4)

1,5 - позначення класу точності приладу, чисельно рівне межі допущеної основної приведеної погрішності, яка визначена при $x_{нрм} = |x|_{max}$ нормуючому значенні (нормується, якщо мультиплікативна складова погрішності мала по порівнянні з адитивною складовою); у подібних випадках це означає, що абсолютна інструментальна погрішність справного засобу вимірювань у нормальних умовах експлуатації не повинна перевищувати значення

$$|\Delta_{инст}| \leq \frac{\gamma_{СИ} \cdot |x|_{max}}{100}, \quad (21)$$

де $\gamma_{СИ}$ - чисельне позначення класу точності засобу вимірювання (СИ).

У наведеному прикладі $|\Delta_{инст}| \leq 0.015 \cdot |x|_{max}$.

1,5 - позначення класу точності приладу, чисельно рівне межі допущеної основної відносної погрішності, яка визначена при $x_{нрм} = |x|$ нормуючому значенні (нормується, якщо адитивна складова погрішності мала по порівнянні з мультиплікативною складовою); у подібних випадках це означає, що абсолютна інструментальна погрішність справного засобу вимірювань у нормальних умовах експлуатації не повинна перевищувати значення

$$|\Delta_{инст}| \leq \frac{\gamma_{СИ} \cdot |x|}{100}, \quad (22)$$

де $\gamma_{СИ}$ - чисельне позначення класу точності засобу вимірювання (СИ), x - результат вимірювання.

У наведеному прикладі $|\Delta_{инст}| \leq 0.015 \cdot |x|$.

1,5| - позначення класу точності приладу, чисельно рівне межі допущеної основної приведеної погрішності, яка визначена при $x_{нрм} = |x_{max} - x_{min}|$ нормуючому значенні (нормується, коли нульове значення вимірюваної

величини перебуває або усередині діапазону, або поза ним); у подібних випадках це означає, що абсолютна інструментальна погрішність справного засобу вимірювань у нормальних умовах експлуатації не повинна перевищувати значення

$$|\Delta_{\text{инст}}| \leq \frac{\gamma_{\text{СИ}} \cdot |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|}{100}, \quad (23)$$

де $\gamma_{\text{СИ}}$ - чисельне позначення класу точності засобу вимірювання (СИ).

У наведеному прикладі $|\Delta_{\text{инст}}| \leq 0.015 \cdot |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|$.

1.5 - позначення класу точності приладу (тільки аналогового омметра), чисельно рівне межі основної приведенної погрішності, яка визначена, як виражене у відсотках відношення довжини ділянки шкали Δl [мм], що відповідає максимальній абсолютній погрішності, до загальної довжини шкали L [мм] (див. п. 3.4).

Позначення виду струму (напруги)

- - постійний струм (напруга),
- ~ - змінний струм (напруга),
- ⎓ - постійний і змінний струм (напруга),

Інші позначення

- ⊥ - нормальне робоче положення приладу вертикальне (на щиті),
- ┌ - нормальне робоче положення приладу горизонтальне,
- ☆ - іспитова напруга міцності ізоляції 500 У,
- ☆2 - іспитова напруга, що перевищує 500 У (тут 2 кВ),
- ☆0 - прилад не підлягає випробуванню міцності ізоляції,
- ⚠ - перед використанням приладу уважно вивчити інструкцію по його експлуатації,
- ⚡ - затискач не ізольований від високої напруги,
- ⊥ - затискач з'єднаний з корпусом, не заземлюється,
- ⊥ - затискач з'єднаний з корпусом, заземлюється.

4.2 Прилади магнітоелектричної системи

Прилади магнітоелектричної системи (або, інакше, магнітоелектричні прилади) є найпоширенішими стрілочними електровимірювальними приладами. Ці прилади мають високу чутливість і застосовуються не тільки, як самостійні прилади для вимірювання сили струму й напруги, але й вбудовуються в інші, більш складні прилади, постачені вимірювальними перетворювачами різного призначення, принципу дії й виконання.

Принцип дії магнітоелектричного приладу (надалі МЕ - приладу) заснований на взаємодії провідника зі струмом і магнітним полем.

На мал. 5 представлений схематичне креслення МЕ - приладу із прикладом можливих написів на його шкалі. Позначення типу вітчизняних приладів містить відомості про систему ('М' - магнітоелектричний) і про завод-виготовлювача (перша цифра '1' - завод "Вібратор").

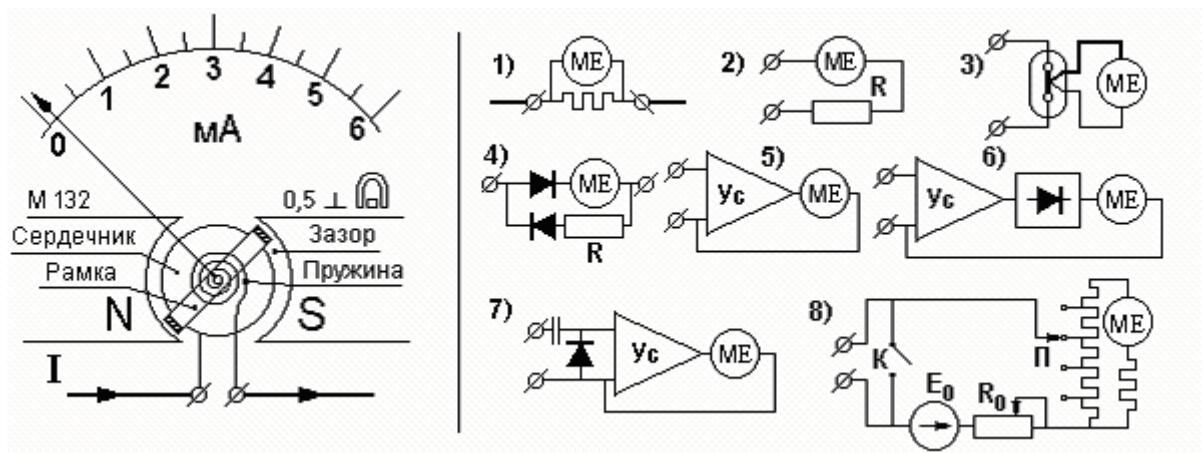


Рисунок 5 – Прилади магнітоелектричної системи, принцип дії, варіанти застосування.

Магнітне поле створюється постійним магнітом, що пройшов стабілізацію. Між полюсами магніту розташований сердечник таким чином, щоб повітряний зазор, у якому рухається рамка з обмоткою, був рівномірним. В обмотку рамки через пружинки або інші пружні елементи, наприклад, розтяжки, надходить струм I , і в результаті його взаємодії з постійним магнітним полем виникає обертаючий момент $M_{BP} = B \cdot S w I$, де B - індукція магнітного поля в зазорі, S - площа обмотки рамки, w - число витків обмотки рамки. Обертаючому моменту протидіє момент, створюваний пружинкою або розтяжкою, що у межах пружних деформацій цих елементів лінійно залежить від кута повороту рамки

α : $M_{np} = W \cdot \alpha$, де W - твердість пружинки (розтяжки). У сталому стані, коли $M_{BP} = M_{np}$,

$$\alpha = \frac{BSw}{W} \cdot I \quad (24)$$

с такою точністю, що забезпечується стабільністю індукції магнітного поля в зазорі й твердості пружинки (розтяжки). Сучасні технології виготовлення й стабілізації магнітів і пружних елементів дозволяють досягати значень основної приведенної погрішності МЕ - приладів аж до 0,1%.

Оскільки кут повороту рамки й, стало бути, стрілки лінійно залежить від струму в рамці, шкали автономно застосовуваних МЕ - приладів рівномірні.

У перехідному режимі, коли струм у рамці змінюється, рух рамки описується диференціальним рівнянням другого порядку, як коливальної системи, що має інерційну масу й твердість:

$$J\alpha'' + P\alpha' + W\alpha = B \cdot Sw \cdot i(t), \quad (25)$$

де J - момент інерції рухомої частини (рамки й стрілки), другий доданок є момент опору, пропорційний швидкості руху рамки. Цей момент для МЕ - приладів складається з моменту опору повітря й моменту гальмування, викликаного струмом, збудженим переміщенням обмотки рамки в магнітному полі (аналог рекуперативного гальмування електричного двигуна). Зазначену властивість МЕ - приладів використовують для запобігання стрілки від ушкоджень при транспортуванні шляхом закорочування обмотки рамки. У цьому випадку струм, збуджений в обмотці рамки при трясці й ударах, буде максимальним, отже, максимальним буде й гальмування стрілки.

Гранично досяжні значення параметрів МЕ - приладів:

- межа наведеної погрішності, що допускає основної, - від 0,1%,
- струм повного відхилення стрілки від 10 мкА.

У силу таких високих показників МЕ - прилади мають широке застосування. Приклади застосувань 1) - 8) показані на мал. 5 праворуч.

1) Використання як амперметр зі стандартними шунтами, спадання напруги на яких 10 мВ, 45 мВ, 75 мВ. Межі вимірювання постійного струму за допомогою таких амперметрів - від $3 \cdot 10^{-7}$ А (гальванометри) до 10 000 А (із шунтом). Основна приведена погрішність від 0,2%.

2) Вольтметр постійного струму з додатковим опором R . Висока чутливість МЕ - приладів дозволяє досягти досить високого опору подібних

вольтметрів. Так, при струмі повного відхилення стрілки приладу 10 мкА опір вольтметра на основі МЕ - приладу складе 100 000 Ом/В. При діапазоні вимірів [0 - 10] В власний опір вольтметра складе 1.0 МОм. Такий високий опір вольтметра забезпечує сприятливі умови взаємодії з об'єктом (див. п. 2.2).

Межі вимірювань від $3 \cdot 10^{-4}$ В до $1 \cdot 10^3$ В. Основна приведена погрішність від 0,2%.

3) Амперметри для вимірювання діючого значення змінного струму в межах від 0.005 А до 100 А (із трансформатором струму) у частотному діапазоні до 10^8 Гц із погрішністю від 1%. Вимірюваний струм надходить у термоперетворювач і нагріває дріт, температура якого визначається виділюваною в ньому активною потужністю цього струму, тобто діючим значенням струму. До цієї ж температури нагрівається гарячий спай термопари, і виникаючий у ній струм вимірюється МЕ - приладом.

4) Випрямний амперметр. Показані на схемі діоди включені в протилежних напрямках для того, щоб включення такого амперметра в досліджуваний ланцюг не приводило до випрямлення струму в цьому ланцюзі. Опір R повинне бути дорівнює опору рамки приладу. Струм у ланцюзі повинен залишатися змінним.

Межі вимірювань від $2,5 \cdot 10^{-3}$ А до 10^4 А (із трансформатором струму). Основна приведена погрішність від 1,5%.

5) Високочутливі електронні аналогові амперметри й вольтметри постійного струму й напруги з підсилювачем. Використовувані тут підсилювачі крім підвищення чутливості забезпечують сприятливі умови взаємодії з об'єктом вимірювань (див. п. 2.2) за рахунок того, що вхідний опір підсилювача струму (для амперметра) може бути зроблений дуже малим, а вхідний опір підсилювача напруги (для вольтметра), навпроти, - дуже великим до $10^7 \div 10^{14}$ Ом.

Межі вимірювань сили струму від $5 \cdot 10^{-10}$ А до 1.0 А, напруги - від $5 \cdot 10^{-6}$ В до 10^3 В. Основна наведена погрішність від 1,5%.

6) Високочутливі електронні амперметри й вольтметри параметрів змінного струму й напруги. У цих приладах, як й у попередніх, підсилювач виконує однакові функції. Крім того тут можуть бути передбачені частотні

фільтри, що забезпечують частотний аналіз вимірюваного (досліджуваного) сигналу.

Межі вимірювань сили струму від 10^{-5} А до 1.0 А, напруги - від $3 \cdot 10^{-6}$ В до $3 \cdot 10^2$ В. Основна приведена погрішність амперметрів і вольтметрів від 1,5%.

Недолік випрямних амперметрів і вольтметрів змінного струму: кут відхилення стрілки МЕ-прилада пропорційний постійної складової випрямленого струму, але всі такі прилади градуюються в діючих значеннях струму й напруги. Це означає, що оголошені характеристики інструментальної погрішності подібних приладів справедливі тільки для тієї форми кривої струму або напруги, для якої виконане градуювання, а саме, для синусоїдальної. Погрішність, викликана відмінністю форми кривій від синусоїдальної, може скласти величину до 11%, що відповідає максимальному значенню коефіцієнта форми кривій.

7) Амплітудний електронний вольтметр. Показана на малюнку вхідний ланцюг, що складається з конденсатора й діода (схема фіксатора), при високому вхідному опорі підсилювача забезпечує виділення на діоді пульсуючої напруги з постійної складової, приблизно рівній подвійній амплітуді вимірюваної напруги. Це відбувається тому, що конденсатор, зарядившись до амплітудного значення напруги в наступний напівперіод замикає діод і тим самим піднімає вхідну напругу на величину його амплітуди. Погрішність такого перетворення викликається частковим розрядом конденсатора на вхідний опір підсилювача.

8) Аналоговий омметр. На схемі показані:

E_0 - внутрішнє джерело постійної напруги,

П - перемикач меж вимірювання,

К - ключ, замикання якого імітує нульове значення вимірюваного опору, при замкнутому ключі К з допомогою змінного опору R_0 встановлюється електричний '0' шкали омметра, якому відповідає струм повного відхилення стрілки МЕ - приладу.

Після установки нуля ключ К розмикається, і виконується вимір опору R_x . Очевидно, що при $R_x = \infty$ струм через МЕ - прилад не тече, стрілка не відхиляється, і оцінка '∞' виявляється на лівій границі шкали опорів омметра.

Межі вимірювання - від одиниць Ом до сотень тисяч Ом. Основна приведена погрішність - не краще, ніж 1,5% .

9) Магнітоелектричний кулонометр. Щоб на основі МЕ - приладу створити прилад для виміру заряду, варто зменшити, по можливості, момент інерції рухливої частини й протидіючий момент. Тому в кулонометрові відсутні пружинки (розтяжки), струм в обмотку рамки подається через безмоментні підведення, а рухома частина максимально полегшена. Тоді в ідеальному випадку рівняння руху рухомої частини кулонометра перебуває з вираження (26):

$$P \cdot \alpha' = BSw \cdot i(t), \quad (26)$$

звідки, по визначенню струму, як швидкості зміни заряду, одержимо

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = \frac{BSw}{P} i(t), \quad \alpha(t_2) - \alpha(t_1) = \frac{BSw}{P} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{BSw}{P} q,$$

де $[t_1, t_2]$ - інтервал часу, протягом якого вимірюваний заряд проходив через обмотку рамки. Результат вимірювання відраховує по шкалі приладу в кулонах, як різниця двох положень стрілки в момент часу приєднання до об'єкта й у момент завершення розряду об'єкта через обмотку рамки. У зв'язку з такою дією МЕ кулонометр забезпечується пристроєм примусової установки стрілки в деяке початкове положення перед кожним вимірюванням.

10) Магнітоелектричний веберметр призначений для вимірювання різниці потокозчеплення досліджуваного постійного магнітного поля з іспитовою котушкою веберметра, площа якої S і число витків $w_{\text{б}}$ відомі. Він улаштований і діє точно так само, як МЕ кулонометр.

Плоска котушка, приєднана до затискачів веберметра, переміщається з однієї в іншу точку досліджуваного магнітного поля. Нехай Φ_1, Φ_2 - магнітні потоки у двох крапках поля, тоді $\Psi_1 = w_{\text{б}} \Phi_1$ й $\Psi_2 = w_{\text{б}} \Phi_2$ - потокозчеплення в цих точках. ЕРС і відповідно, струм, що індуються в котушці при її переміщенні із точки до точки, обчислюються через похідну від потокозчеплення за часом. Зокрема, $i(t) = \Psi'_t(t) / R$, де R - опір кола. Підставляючи ці вираження у формули, записані вище для кулонометра, одержимо:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{BSw}{P} i(t), \quad \alpha(t_2) - \alpha(t_1) = \frac{BSw}{P} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{BSw}{PR} (\Psi_2 - \Psi_1).$$

Таким чином, для вимірювання різниці між магнітними потоками (або потокозчеплення) у двох точках магнітного поля необхідно встановити стрілку веберметра в деяке положення, потім приєднати до нього плоску котушку з відомою площею й числом витків і перемістити її між цими точками магнітного поля. Стрілка веберметра переміститься, і результатом вимірювання буде різниця положень стрілки, відлічена в одиницях магнітного потоку.

Межі вимірювань від 500 мкВб до 10^4 мкВб. Основна приведена погрішність від 1,5%.

4.3 Прилади електродинамічної системи

Принцип дії приладів електродинамічної системи (надалі ЕД-приладів) і приклад позначень на шкалі показані на мал. 6.

Обертаючий момент створюється в результаті взаємодії струмів, що протікають у рухомій і нерухомій котушках. Цей момент пропорційний добутку миттєвих значень струмів:

$$M_{BP}(t) = K_{ЭД} \cdot i_1(t) i_2(t). \quad (27)$$

Момент інерції рухомої частини приладу (котушка й стрілка) досить велика, і тому вона не встигає реагувати на швидкі зміни струмів, тобто є простим механічним низькочастотним фільтром. Оскільки ці прилади, як правило, призначені для вимірювання характеристик періодичних

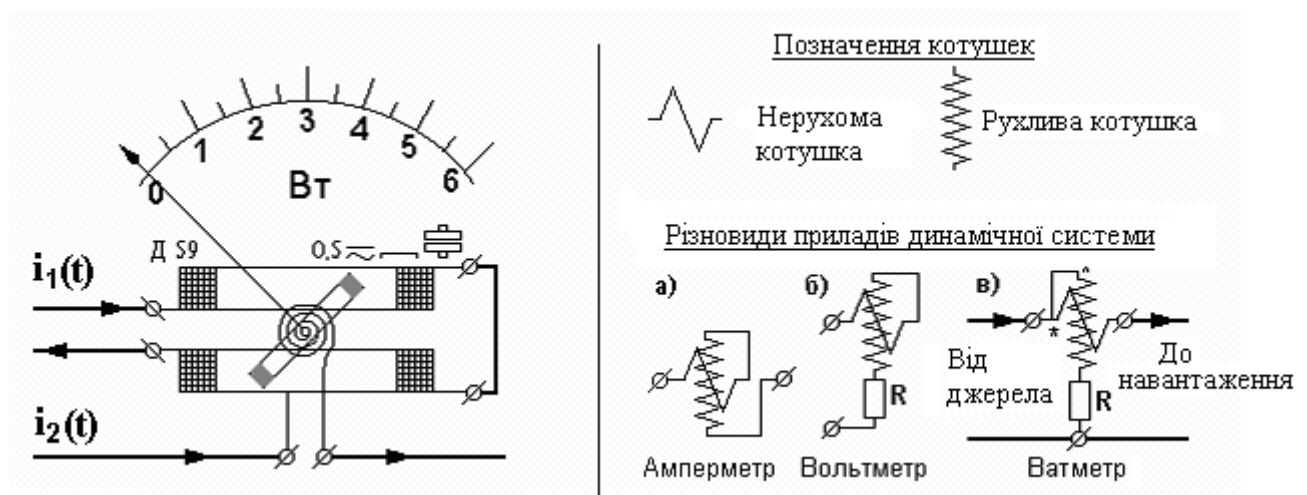


Рисунок 6 – Прилади електродинамічної системи. Принцип дії, позначення, варіанти застосування.

сигналів, то постійна складова обертаючого моменту записується у вигляді середнього значення

$$\overline{M}_{BP} = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T} \int_t^{t+T} i_1(t) \cdot i_2(t) \cdot dt, \quad (28)$$

де T - період сигналів струму $i_1(t), i_2(t)$, $K_{\text{ЭД}}$ - постійний коефіцієнт.

На основі механізму електродинамічної системи створюються амперметри, вольтметри й ватметри (див. схеми а), б), в) мал. 6).

а) ЕД амперметр. Зі схеми мал. 6 видно, що через обидві котушки тече той самий струм, тому середнє значення обертаючого моменту пропорційно діючому значенню вимірюваного струму поза залежністю від форми кривої струму:

$$\overline{M}_{BP} = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) \cdot dt.$$

Із цієї формули треба, що ЕД амперметр дозволяє вимірювати постійний струм і діюче значення змінного струму, про що говорить спеціальний знак на шкалі. Внаслідок значної індуктивності котушок частотний діапазон ЕД амперметрів обмежений зверху значенням 5000 Гц. У зв'язку із цим при наявності в кривій струму високочастотних складових, які перевищують частотний діапазон приладу, все-таки з'являється незначна залежність результатів вимірювань від форми кривої.

Граничні властивості ЕД амперметрів.

- межа допущеної основної приведенної погрішності - від 0,2% до 1,0%,
- діапазон вимірювань - від 0,005 А й вище, із трансформатором струму - до 6 000 А,
- діапазон частот - 0; 45 - 5000 Гц,
- власний опір не більше декількох Ом.

Шкала ЕД амперметра нерівномірна. Конструктивними заходами шляхом підбора форми котушок її прагнуть зробити рівномірною. На шкалах вітчизняних ЕД амперметрів звичайно нанесені жирні точки, за межами яких оголошений клас точності не забезпечується.

б) ЕД вольтметр. У силу відзначених обставин ЕД вольтметр використовується для вимірювання постійного й діючого значення змінної напруги практично поза залежністю від форми кривої, якщо частоти вищих гармонік кривої напруги не виходять за межі його частотного діапазону. Через великий споживаний струм (3 мА) опір ЕД вольтметра не може бути великим. Так, на межі 30 В його опір не може бути більше 10000 Ом. Тому ЕД

вольтметри застосовуються для вимірювань у потужних колах, у яких шунтуюча дія їхнього невисокого опору не буде помітно виявлятися на результатах вимірювань.

Граничні властивості ЕД вольтметрів.

- межа допущеної основної приведенної погрішності - від 0,2% до 1,0%,
- діапазон вимірювань - від 5 В до 600 В, із трансформатором - до $3 \cdot 10^4$ В.

- діапазон частот - до 5000 Гц,
- власний опір - (100 - 2000) Ом.

Властивості шкал ЕД вольтметрів такі ж, як у шкал ЕД амперметрів.

в) ЕД ватметр. Призначений для вимірювання потужності, виділюваної постійним і змінним струмом у навантаженні. Струм навантаження, що може досягати десятків амперів, проходить через нерухому котушку, називану *послідовним ланцюгом ватметра*. Через рухому котушку (*паралельний ланцюг ватметра*) пропускається струм, пропорційний напрузі, що подається від джерела. Для періодичних сигналів з урахуванням зсуву фаз φ між струмом і напругою вираження для середнього обертаючого моменту має вигляд:

$$\overline{M}_{BP} = \frac{K_{ЭД}}{T} \int_t^{t+T} i(t) \cdot \frac{u(t + \varphi)}{R} \cdot dt = K_{BT} \cdot I_D U_D \cdot \cos \varphi, \quad (29)$$

де I_D, U_D - діючі значення струму й напруги, K_{BT} - постійний коефіцієнт.

З останнього вираження видно, що обертаючий момент, і отже, кут відхилення стрілки електродинамічного ватметра прямо пропорційний активної потужності. Тому шкала електродинамічного ватметра лінійна.

Затискачі ватметра, позначені зірочкою, як це показано на мал. 6 в), приєднуються до проводів, що йдуть від джерела, і тому ці затискачі називаються *генераторними*.

Граничні властивості електродинамічних ватметрів.

- межа допущеної основної приведенної погрішності від 0,05%,
- межі вимірювання від одиниць ватів до $10^8 \div 10^{10}$ Вт (із трансформаторами струму й напруги).
- діапазон частот - 45 (2000 Гц.

4.4 Прилади феродинамічної системи

Призначення, схеми включення й принцип дії - ті ж, що й в ЕД - приладах. Як видно з мал. 7, конструктивне розходження полягає в тому, що з метою посилення електромагнітного поля нерухомої котушки, вона постачена магнітопроводом з листової складальної електротехнічної сталі. За аналогією з МЕ - приладами, магнітопровід постачений наконечниками й - для зменшення магнітного опору - сердечником, так що для рухомої котушки забезпечується рівномірний повітряний зазор.

За рахунок зазначених заходів обертаючий момент ФД - приладів істотно збільшений, а вся магнітна система виявляється екранованою від дії зовнішніх магнітних полів, які можуть виникати на енергоємних підприємствах, особливо в місцях розташування приладових щитів. Тому найчастіше ФД - прилади застосовуються, як щитові прилади для вертикального розташування. Через порівняно великий обертаючого моменту ФД - прилади стійкі до тряски й вібрацій й успішно застосовуються на залізничних, морських і повітряних транспортних засобах. Стрілка й шкала й інші індикатори ФД - приладів

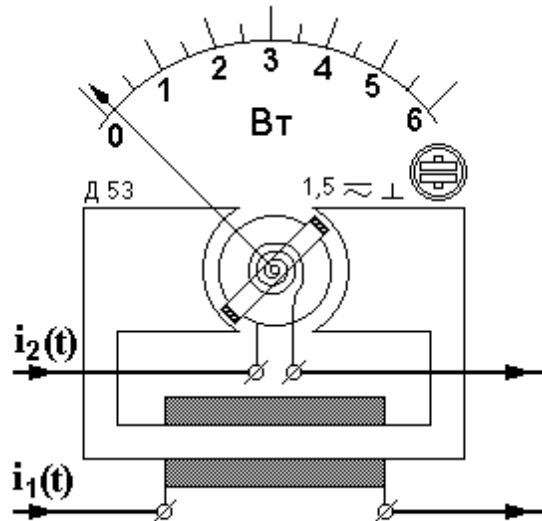


Рисунок 7 – Принцип дії приладу феродинамічної системи.

звичайно робляться добре видимими зі звичайної відстані від щита 1 - 2,5 м, за яким стежить технолог, керуючий виробничим процесом.

З іншого боку, наявність магнітопровода значно збільшує індуктивність нерухомої котушки, і тому частотний діапазон ФД - приладів істотно відрізняється від частотного діапазону ЕД - приладів.

Діапазони вимірювань діючих значень струму, напруги й активної потужності ті ж, що й в ЕД - приладах.

Точність ФД - приладів нижче й не буває краще, ніж 0,5%. Частотний діапазон 0 Гц, 45 - 500 Гц. Власний опір ФД вольтметрів становить (100 - 2000) Ом. Велике значення обертаючого моменту дає можливість використати ФД механізм для побудови самописних приладів. Для цього на стрілці встановлюється пишучий інструмент (перо, чорнильниця), і в прилад

вбудовується стрічкопротягувальний механізм, що переміщає паперову стрічку - діаграму.

4.5 Прилади електромагнітної системи

Принцип дії приладів електромагнітної системи (надалі ЕМ - прилади) пояснюється мал. 8, на якому наведені типові написи на шкалі. Обертаючий момент створюється за рахунок того, що струм $i(t)$, що протікає по котушці, виконаної, як соленоїд із щелевидним отвором, створює електромагнітне поле, що втягує усередину котушки фігурну пластину, виготовлену з електротехнічної сталі. Цей момент пропорційний квадрату сили струму й містить тому постійну й змінну складові. Частота першої гармоніки змінної складової дорівнює подвоєній частоті першої гармоніки вимірюваної сили струму. У силу інерційності рухомої частини змінна складова фільтрується, і середній обертаючий момент дорівнює

$$\overline{M}_{BP} = \frac{K_{\text{ЭМ}}}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) \cdot dt, \quad (30)$$

де T - період вимірюваного струму, $K_{\text{ЭМ}}$ - постійний коефіцієнт.

Як видно із цього вираження, ЕМ - прилади дозволяють вимірювати діюче значення змінного струму, а також силу постійного струму, про що свідчить також відповідний знак на шкалі.

Із принципу дії ЕМ - приладів треба, що на його показання можуть робити сильний вплив зовнішні магнітні поля. Щоб зменшити їхню дію, в ЕМ - приладах передбачається диференціальна конструкція, як це показано на мал. 8.

Компенсація дії зовнішнього поля відбувається за рахунок того, що моменти, які воно створює при впливі на обидві сторони рухомої частини, діють у протилежних напрямках, а моменти, створювані вимірюваним струмом, діють в одному напрямку. Ця компенсація буде неповною, якщо зовнішнє поле неоднорідно в обсязі рухомого механізму приладу.

На мал. 8 показаний ЕМ амперметр. ЕМ вольтметр утворюється приєднанням до ЕМ амперметра послідовно додаткового опору. У силу квадратичної залежності обертаючого моменту від сили струму шкала ЕМ - приладів нерівномірна. Рівномірності шкали на робочій частині добиваються шляхом підбора форми пластин, що втягуються в котушку.

Метрологічні й експлуатаційні властивості ЕМ - приладів невисокі. Струм повного відхилення стрілки не менш 5 мА, межа допущеної основної

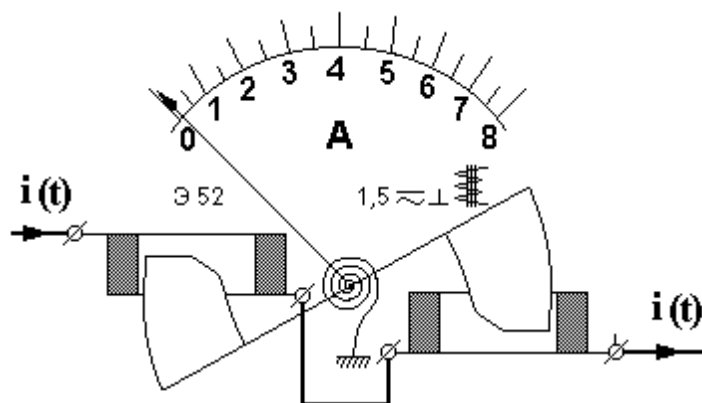


Рисунок 8 – Принцип дії приладу електромагнітної системи.

вартості використовуваних матеріалів й, отже, знижена ціна в порівнянні з іншими приладами, що мають рівні метрологічні властивості.

Основне застосування - як щитові прилади, у тому числі, на транспортних засобах.

приведеної погрішності не менш 0,5%, частотний діапазон становить 0 Гц й 40-3000 Гц. Власний опір ЕМ - вольтметрів становить (100 - 2000) Ом.

Достоїнством ЕМ - приладів є відсутність струмопідводів до рухомої частини, низька трудомісткість у виготовленні й низькій

4.6 Прилади електростатичної системи

Дія електростатичного приладу (надалі ЕС - приладу) заснована на використанні сили, що виникає між пластинами повітряного конденсатора, заряди на яких мають різні знаки. Схематичне креслення ЕС - приладу представлено на мал. 9. Вимірювана напруга $u(t)$ прикладається до нерухомих і рухомих пластин, які під дією зазначеної сили втягуються в простір між нерухомими пластинами.

Обертаючий момент пропорційний квадрату напруги й містить тому постійну й змінну складову. Частота першої гармоніки змінної складової у два рази більше частоти першої гармоніки вимірюваної напруги. В чинність інерційності рухомої частини змінна складова обертаючого моменту фільтрується, і рухома частина відхиляється на кут, пропорційний постійній складовій, тобто середньому значенню обертаючого моменту:

$$\overline{M}_{BP} = \frac{K_{ЭС}}{T} \int_t^{t+T} u^2(t) \cdot dt, \quad (31)$$

де T - період вимірюваного струму, $K_{ЭС}$ - постійний коефіцієнт.

Устрій і принцип дії ЕС - приладу говорять про те, що ЕС - приладом може бути тільки вольтметр, що забезпечує вимірювання постійної напруги й діючого значення змінної напруги. ЕС - вольтметр виділяється серед вольтметрів всіх систем, у тому числі й електронних, своїм екстремально

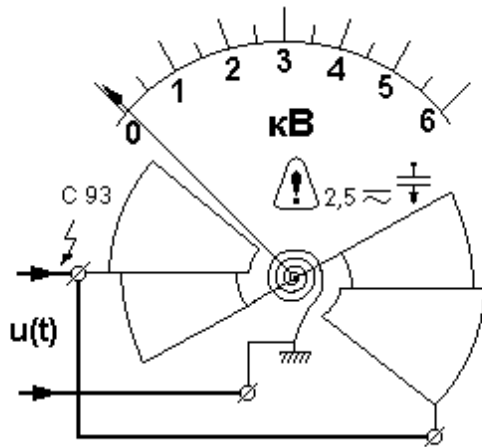


Рисунок 9 – Принцип дії приладу електростатичної системи.

високим опором, що при вимірюванні постійної напруги дорівнює опорі ізоляції. При вимірюванні змінної напруги власний опір ЕС-вольтметра визначається його ємністю, що не перевищує кількох сотень пікофарад.

Основним недоліком вольтметрів електростатичної системи є низький обертаючий момент, через що діапазон вимірюваних напруг обмежений знизу значенням 30 В, і він може

застосовуватися тільки за умови захисту від вібрацій і тряски.

З іншого боку, вольтметри електростатичної системи забезпечують вимірювання високих напруг до 300 кВ без використання дільника напруги й практично без власного споживання потужності від об'єкта.

Досягнута межа допущеної основної приведенної погрішності ЕС вольтметрів - 0,5%. Частотний діапазон: 0 Гц, $40 \div 10^7$ Гц.

4.7 Прилади індукційної системи

Єдиним різновидом приладів індукційної системи є лічильники активної й реактивної електричної енергії змінного струму, споживаної навантаженням. Устрій лічильника електричної енергії схематично представлений на мал. 10. Рухомою частиною цього приладу є диск із електропровідного матеріалу (звичайно це алюміній, який володіє найменшою вагою). Диск обертається на осі, закріпленій в під'ятниках, які повинні бути зносостійкими й створювати мінімальний і незмінний у часі момент тертя. Обертаючий момент створюється двома електромагнітами, розташованими по різні сторони від диска.

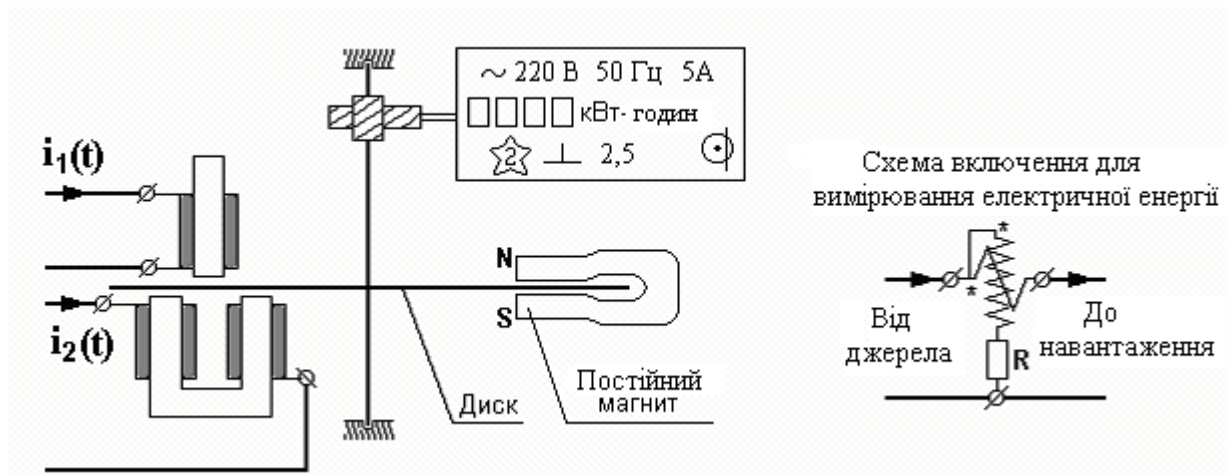


Рисунок 10 – Прилад індукційної системи (лічильник електричної енергії).
Принцип дії, позначення, схема включення.

Їхнє розташування таке, що вихрові струми, створювані ними в диску, взаємодіють із полями цих електромагнітів, і при цьому взаємодії виникає момент, пропорційний добутку струмів:

$$M_{BP}(t) = K_{ИНД} \cdot i_1(t) i_2(t). \quad (32)$$

Якщо в одному з електромагнітів протікає струм навантаження (назвемо цей ланцюг за аналогією з подібним ланцюгом ЕД ватметра *послідовною*, див. п. 4.3), а в іншому електромагніті протікає струм, пропорційний напрузі на навантаженні, тобто $i_2(t) = u(t) / R$ (назвемо цей ланцюг *паралельною*, як відповідний ланцюг ЕД ватметра, див. п. 4.3), де R - додатковий опір паралельного кола, то середній обертаючий момент, як й у випадку ЕД ватметра, буде пропорційний активної потужності:

$$\overline{M}_{BP} = \frac{K_{ИНД}}{T} \int_t^{t+T} i(t) \cdot \frac{u(t + \varphi)}{R} \cdot dt = K_{сэ} \cdot I_D U_D \cdot \cos \varphi, \quad (33)$$

де φ - кут зсуву фази між струмом і напругою в навантаженні.

Власний опір послідовної обмотки (струму) роблять якнайменше (десяті долі Ом), а опір паралельної обмотки (напруги) - якнайбільше (одиниці й десятки кОм).

Якби протидіючий момент створювався пружинкою, то кут повороту диска був би пропорційний потужності. Однак, відсутність протидіючої пружинки дозволяє диску обертатися, тобто виконувати операцію інтегрування кутової швидкості його обертання. Якщо кутова швидкість обертання диска пропорційна потужності, то кут повороту диска (який відображається індикатором з округленням до цілого числа оборотів) пропорційний інтегралу

від потужності, тобто енергії. Для забезпечення цієї пропорційності протидіючий момент створюється стабілізованим постійним магнітом. Гальмовий протидіючий момент виникає за рахунок того, що при прямованні диска в поле магніту в диску виникає струм, пропорційний швидкості його обертання, і цей струм взаємодіє з полем магніту, гальмуючи обертання, як це відбувається при рекуперативному гальмуванні електричного двигуна постійного струму.

Рівномірне обертання має місце тоді, коли рівні моменти: обертаючий і протидіючий, тобто, коли $M_{BP} = M_{PP}$. Оскільки обертаючий момент пропорційний потужності P , а протидіючий пропорційний кутовій швидкості обертання ω ,

$$K_{BP} \cdot P = K_{PP} \cdot \omega + M_{TP}, \quad (34)$$

де K_{BP} , K_{PP} - коефіцієнти пропорційності, M_{TP} - момент тертя в під'ятниках.

Звідси, зневажаючи моментом тертя, одержуємо:

$$\omega = \frac{K_{BP}}{K_{PP}} \cdot P, \quad \alpha(t) = \int_0^t \omega \cdot dt = \frac{K_{BP}}{K_{PP}} \cdot \int_0^t P \cdot dt = K_{ЭН} \cdot A(t),$$

де $\alpha(t)$ - кут повороту диска лічильника за час t , $A(t)$ - електрична енергія, спожита за час t , $K_{ЭН}$ - коефіцієнт пропорційності.

Таким чином, кількість оборотів диска лічильника, пропорційно енергії. Обертання диска через черв'ячне зачеплення передається на лічильник числа оборотів, що відображається на цифровому індикаторі.

Побутові й промислові лічильники призначені для вимірювання кількості електричної енергії, виділюваної змінним струмом частотою 50 Гц.

Метрологічні властивості лічильників електричної енергії:

- побутові лічильники призначені для вимірювання електричної енергії при напрузі 220 В и струмах 5.0, 10.0 А, межа допущеної основної відносної погрішності (тобто приведеної до поточного показання) 2.5%,

- промислові лічильники призначені для вимірювання рівчаків великої електричної енергії при напрузі 3000 В и струмах до 1000 А, межа допущеної основної відносної погрішності (тобто приведеної до поточного показання) від 0.5%.

Нормуванням і міжнародною уніфікацією властивостей лічильників електричної енергії займається спеціальний комітет міжнародної

електротехнічної комісії (МЕК), оскільки результати вимірювань рівчаків електричної енергії через державні кордони є основою для відповідних розрахунків й економічних санкцій.

Схема включення лічильника електричної енергії точно така, як схема включення ватметра (зрівняти мал. 6 в і схему мал. 10). Так само, як у ватметра, генераторні затискачі лічильника позначені зірочкою. Після приєднання лічильника до електричного кола корпус лічильника й всіх приєднувальних затискачів пломбуються щоб уникнути економічних зловживань.

4.8 Засоби розширення меж вимірювання й правила вибору відповідної межі

4.8.1 Типові способи й засоби розширення меж вимірювань

Розширення меж вимірювання приладів - це важлива техніко - економічне завдання, метою якого є зменшення обсягу приладового парку підприємства без шкоди для метрологічного забезпечення випробувань виробів і керування технологічними процесами. При наявності засобів розширення меж вимірювання виявляється можливим застосовувати той самий звичайно дорогий прилад для вимірювання величин різного розміру. У конкретних ситуаціях може знадобитися змінити межу вимірювання убік збільшення верхньої межі вимірювань, тобто зменшити чутливість приладу, а в інших випадках навпаки, - підвищити чутливість, тобто змінити межу вимірювання убік зменшення верхньої межі вимірювання. Можливі два варіанти рішення цього завдання.

У першому варіанті засобу розширення меж вимірювання вбудовуються у вимірювальний прилад, що забезпечується ручним перемикачем меж. Такий прилад є багатомежним, і метрологічні характеристики цього приладу (див. п. 3.5) на різних межах можуть розрізнятися. Тоді вони нормуються для кожної межі вимірювання окремо. Про це споживачеві повідомляється написами на шкалі або в супровідній документації.

У другому варіанті використовуються зовнішні засоби розширення меж вимірювань. Цей варіант використовується там, де вимірювання на одній обраній межі виконуються впродовж тривалого часу, наприклад, у системах керування технологічним процесом.

Такий зовнішній засіб розширення меж вимірювання є не що інше, як *масштабуючий лінійний вимірювальний перетворювач*, що змінює не вид вимірюваної величини, а лише її масштаб. Ці перетворювачі випускаються промисловістю, як автономні засоби вимірювань (ЗВ). Кожна група таких перетворювачів має уніфіковані властивості, приєднувальні розміри й метрологічні характеристики. Тому при їхньому з'єднанні з одностороннім вимірювальним приладом фактично виходить новий прилад, метрологічні характеристики якого повинні бути розраховані по метрологічних характеристиках з'єднаних компонентів.

Як зовнішні засоби розширення меж вимірювання використовуються:

- шунти - для розширення меж вимірювання сили струму убік збільшення максимального значення вимірюваної величини, тобто для зменшення чутливості,

- дільники напруги й додаткові опори - для розширення меж вимірювання напруги убік збільшення максимального значення вимірюваної величини, тобто для зменшення чутливості,

- підсилювачі струму й напруги - для розширення меж вимірювання струму або напруги убік зменшення максимального значення вимірюваної величини, тобто для збільшення чутливості,

- вимірювальні трансформатори струму й напруги - можуть застосовуватися для розширення меж вимірювання струму або напруги в обидва боки, але найчастіше застосовуються для розширення меж вимірювання убік збільшення максимального значення вимірюваної величини, тобто для зменшення чутливості.

4.8.2 Шунти

Схема з'єднання одностороннього амперметра із шунтом показана на мал. 11. Шунт має чотири затискачі. Пари затискачів L_1, L_2 називаються *струмовими затискачами*, до них підключається лінія з вимірюваним струмом. Два інших затискачі P_1, P_2 - *потенційні*, до них підключається амперметр, власне опір якого показане на малюнку й позначене через R_A . Потенційні затискачі жорстко з'єднані між певними точками шунта шляхом зварювання або інших методів, що забезпечують високу стабільність розташування цих точок і

зневажливо малий і стабільний перехідний опір від цих точок до потенційних затискачів. Безпосереднє приєднання амперметра до струмових затискачів неприпустимо, оскільки в цьому випадку нестабільність опору контактів у струмових затискачах через різні зусилля при гвинтовому з'єднанні, через влучення бруду й пилю при великій силі струму буде викликати відповідну нестабільність спадання напруги на цих контактах і погрішність вимірювання, що не може бути гарантована виготовлювачами амперметра й шунта й не може бути визначена при вимірюванні.

Опір шунта між точками приєднання потенційних затискачів позначен через $R_{ш}$.

Нехай I_A - струм повного відхилення стрілки, що відповідає верхній межі

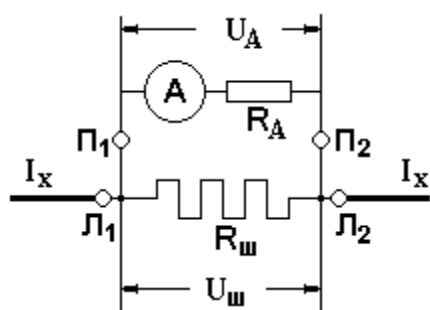


Рисунок 11 – З'єднання амперметра із шунтом.

діапазону вимірювання амперметра А, а U_A - спадання напруги на опорі амперметра при цьому струмі: $U_A = I_A R_A$.

Нехай I_{max} - верхня межа діапазону вимірювання сили струму, що бажано забезпечити за допомогою шунта.

Очевидно, що при цій силі струму повинне виконуватися рівність $I_A R_A = (I_{max} - I_A) R_{ш}$, звідки одержуємо

значення масштабного коефіцієнта розширення межі вимірювання сили струму:

$$K = \frac{I_{max}}{I_A} = 1 + \frac{R_A}{R_{ш}}. \quad (35)$$

Завжди $K > 1$.

У нормативній і супровідній документації на шунти вказуються наступні метрологічні характеристики шунтів:

- номінальне падіння напруга на шунті при максимальному значенні сили струму в діапазоні вимірювання з наступного стандартного ряду: 10 мВ, 45 мВ, 75 мВ,

- верхня межа діапазону вимірювань, що забезпечує даний шунт,
- верхня межа вимірювання сили струму амперметром, з яким може бути використаний даний шунт,

- межа допущеної основної відносної погрішності перетворення (основним джерелом погрішності є погрішність відтворення *масштабного* коефіцієнта ДО, що породжує мультиплікативну складову інструментальної погрішності)

- межі допущеної додаткової погрішності.

У документації на шунти, призначені для роботи на змінному струмі, вказується частотний діапазон, у якому їхня основна погрішність не перевищує нормовану межу.

Для забезпечення сумісності шунта з амперметром у документації на амперметр й, як правило, на його шкалі вказується спадання напруги на внутрішньому опорі амперметра при струмі повного відхилення стрілки з ряду 10 мВ, 45 мВ, 75 мВ.

4.8.3 Додаткові опори

Для розширення меж вимірювання напруги можуть використатися дільники напруги й додаткові опори. Однак, через те, що дільник напруги повинен споживати від об'єкта струм, що перевищує струм власного споживання вольтметра, на практиці для розширення меж вимірювання вольтметрів застосовують додаткові опори. Виключення становить тільки електростатичний вольтметр, що практично не споживає струм, і з ним можуть використатися дільники напруги, складені з активних опорів або конденсаторів.

Додатковий опір з'єднується послідовно з вольтметром. Якщо власний опір вольтметра R_B , а значення додаткового опору R_D , то при підключенні до вольтметра додаткового опору верхня межа вимірювання збільшується до напруги

$$U_{max} = I_{Bmax}(R_B + R_D), \quad (36)$$

де I_{Bmax} - струм повного відхилення стрілки вольтметра.

Тому коефіцієнт розширення меж вимірювання дорівнює:

$$K = \frac{I_{Bmax}(R_B + R_D)}{I_{Bmax}R_B} = 1 + \frac{R_D}{R_B}. \quad (37)$$

Завжди $K > 1$.

Для забезпечення сумісності додаткового опору й вольтметра, до якого воно підключається, у документації на вольтметр й, як правило, на його шкалі

вказується струм повного відхилення стрілки. Відповідний додатковий опір підбирається по наступних ознаках:

- за коефіцієнтом розширення межі вимірювання $R_D = R_B(K - 1)$,
- по максимально припустимому струмі через R_D , що не повинен бути менше, ніж I_{Bmax} , щоб додатковий опір не перегрівався цим струмом,
- по характеристиках інструментальної погрішності створеного в такий спосіб нового вольтметра, що буде складатися із власної погрішності вольтметра й погрішності додаткового опору, у тому числі, що виникає в результаті перегріву струмом, що протікає по ньому.

З урахуванням викладеного в документації на додатковий опір наводяться наступні метрологічні характеристики:

- номінальне значення опору,
- межа допущеної основної відносної погрішності (оскільки, за аналогією з п. 4.8. 2, адитивна складова зневажливо мала в порівнянні з мультиплікативною),
- максимально припустиме значення сили струму,
- межа допущеної додаткової погрішності.

4.8.4 Вимірювальні трансформатори струму

Застосовуються для розширення меж вимірювання характеристик змінного струму. Вимірювальні трансформатори струму мають істотну перевагу перед шунтами, яка полягає в тому, що при їхньому застосуванні відсутній гальванічний зв'язок між первинною обмоткою, включеної в потужний електричний ланцюг об'єкта, і вторинною обмоткою. Розрив цього гальванічного зв'язку сприяє забезпеченню безпеки персоналу, зниженню дії перешкод і полегшує виконання необхідних з'єднань у вторинному ланцюзі.

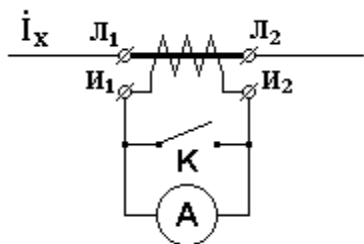


Рисунок 12 – Застосування трансформатора струму.

Крім того в обмеженому частотному діапазоні коефіцієнт перетворення (масштабування) визначається тільки відношенням числа витків обмоток трансформатора й мало залежить від зовнішніх факторів, що впливають. Схема включення вимірювального трансформатора

струму в лінію з вимірюваним струмом I_x і приєднання амперметра до вторинної обмотки представлена на мал. 12. На цьому малюнку L_1, L_2 - затискачі первинної обмотки трансформатора, до яких підключена лінія, I_1, I_2 - затискачі вторинної обмотки, до яких підключається амперметр, ДО - ключ, що замикає вторинну обмотку.

Як відомо, небезпечним режимом для трансформатора струму є режим холостого ходу, при якому на вторинній обмотці розвивається висока напруга, і можливий пробій ізоляції. Навпроти, сприятливим режимом для трансформатора струму є режим короткого замикання вторинної обмотки. У зв'язку із цим надзвичайно важливо виконувати наступні правила включення трансформатора струму з амперметром у лінію.

Перед включенням первинної обмотки в лінію вторинна обмотка обов'язково повинна бути замкнутою на амперметр або ключем K , показаним на мал. 12. Якщо обмотка була замкнута ключем, то його можна розімкнути для роботи тільки тоді, коли включений амперметр і перевірена цілісність його кола і якість контактів у місцях приєднань.

Як уже було сказано, коефіцієнт перетворення трансформатора струму в обмеженому діапазоні частот дорівнює відношенню числа витків обмоток трансформатора й може бути як більше, так і менше одиниці.

Особливістю вимірювального трансформатора струму є також те, що на відміну від інших трансформаторів струму він має нормовані метрологічні характеристики:

- межі зміни сили струму первинної обмотки, що підлягає вимірюванню,
- межа вимірювання амперметра, включеного у вторинну обмотку,
- межа допущеної основної відносної погрішності по амплітуді,
- межа допущеної основної погрішності по фазі,
- граничні значення опору навантаження у вторинній обмотці, при яких інструментальні погрішності трансформатора не перевищують норм, установлених на основні погрішності
- межі допущених додаткових погрішностей,
- частотний діапазон, у якому інструментальні погрішності трансформатора не перевищують норм, встановлених на основні погрішності.

4.8.5 Вимірювальні трансформатори напруги

Вимірювальні трансформатори напруги застосовуються для розширення меж вимірювання характеристик змінної напруги. Застосування вимірювальних трансформаторів напруги дає ті ж переваги перед застосуванням додаткових опорів, що й застосування трансформаторів струму (п. 4.8.4). В обмеженому частотному діапазоні коефіцієнт перетворення (масштабування) визначається тільки відношенням числа витків обмоток трансформатора й практично не залежить від дії зовнішніх факторів, що впливають. Зі збільшенням частоти понад цей діапазон починають зростати погрішності передачі амплітуди й фази вимірюваної напруги. Схеми з'єднань трансформатора напруги з ділянкою електричного кола й з вольтметром у вторинній обмотці особливостей не мають.

Вимірювальний трансформатор напруги відрізняється від інших трансформаторів напруги тим, що він має наступні нормовані метрологічні характеристики:

- межі зміни напруги, що діє на первинній обмотці,
- межа вимірювання вольтметра, включеного у вторинну обмотку,
- межа допущеної основної відносної погрішності по амплітуді,
- межа допущеної основної погрішності по фазі,
- граничні значення опору навантаження у вторинній обмотці, при яких інструментальні погрішності трансформатора не перевищують норм, встановлених на основні погрішності,
- межі допущених додаткових погрішностей,
- частотний діапазон, у якому інструментальні погрішності трансформатора не перевищують норм, встановлених на основні погрішності.

4.8.6 Правило вибору меж вимірювання

При виборі меж вимірювання аналогових приладів варто мати на увазі, що з норми, встановленої на їхню інструментальну погрішність, як на приведену до максимального значення в діапазоні вимірювання (див. п. 3.5), прямує, що споживачеві даються гарантії тільки в тому, що поза залежністю від істинного значення вимірюваної величини в будь-якій точці шкали

$$|\Delta_{инст}| \leq \frac{\gamma_{СИ} \cdot |x|_{max}}{100}, \quad (38)$$

де $\gamma_{СИ}$ - гарантоване значення основної приведенної погрішності приладу, допущеного до застосування й $ж$ - чисельне позначення класу точності приладу.

Це означає, що якщо істинне значення вимірюваної величини становить половину від максимального, тобто показання приладу виявляється в середині шкали, то про відносну погрішність $\gamma_{рез}$ результату такого вимірювання споживач не може припускати нічого, крім того, що

$$|\gamma_{рез}| = \frac{|\Delta_{инст}|}{|x|} \cdot 100\% \leq \frac{\gamma_{СИ} \cdot |x|_{max}}{|x|_{max} / 2} = 2\gamma_{СИ}. \quad (39)$$

Якщо істинне значення вимірюваної величини становить третину від верхньої межі вимірювань, то відносна погрішність результату виявляється втричі більше, ніж оголошений клас точності. Взагалі, чим ближче до початку шкали показання приладу, тим більше відносна погрішність результату вимірювання.

У зв'язку із цим варто керуватися *наступним правилом вибору межі вимірювань*.

Межа вимірювань аналогового вимірювального приладу варто вибирати таким чином, щоб показання приладу перебували в останній третині його шкали. При такому виборі зростання відносної погрішності результатів вимірювань стосовно оголошеного класу точності приладу не буде перевищувати 1,5.

4.9 Застосування аналогових приладів для вимірювань у трифазних колах змінного струму

Будуть розглянуті особливості вимірювань у трифазних колах змінного струму наступних величин: діючих значень струму й напруги, активній і реактивній потужності й енергії. Тривіальні методи вимірювань зазначених величин трьома окремими приладами в кожній фазі або в кожній лінії розглядати не будемо в силу їхньої очевидності.

4.9.1 Вимірювання лінійних струмів і напруг у трифазному трипроводному колі

Розглядається підхід, що дозволяє на відміну від очевидного випадку використати замість трьох трансформаторів струму або напруги відповідно тільки два трансформатори при будь-якій схемі включення навантаження

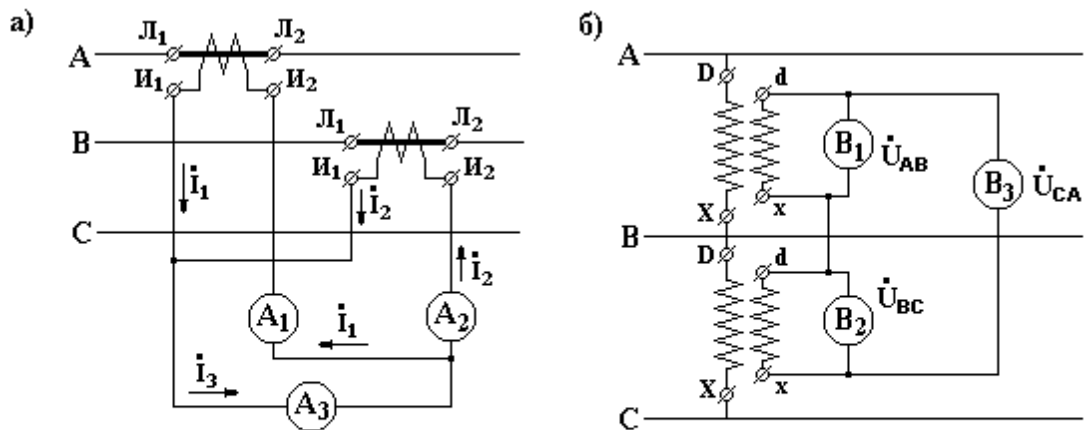


Рисунок 13 – Вимірювання лінійних струмів і напруг у трифазних трипроводних ланцюгах.

(зірка або трикутник). Схеми включення трансформаторів і приладів показані на мал.13.

Така економія вимірювальних трансформаторів виявилася можливою завдяки тому, що в трифазних трипроводних колах сума лінійних струмів і сума лінійних напруг дорівнюють нулю, звідки прямує, що

$$\dot{I}_3 = -(\dot{I}_1 + \dot{I}_2), \quad \dot{U}_{CA} = -\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{BC}.$$

Оскільки амперметри A_1, A_2, A_3 й вольтметри B_1, B_2, B_3 суть прилади, призначені для вимірювання діючих значень струмів і напруг відповідно, інвертування фази вони не почувають.

4.9.2 Вимірювання активної електричної потужності й енергії в симетричних трифазних колах одним приладом

Оскільки схеми включення ватметра й лічильника електричної енергії однакові (зрівняти мал. 6 в і схему мал. 10), під поняттям “прилад” ми будемо мати на увазі обидва зазначених засоби вимірювань.

Якщо схема включення навантаження - зірка з доступною нейтралю, то прилад включається відповідно до мал. 14 а), і загальна активна потужність й енергія, споживана навантаженням виходить множенням на три показання приладу.

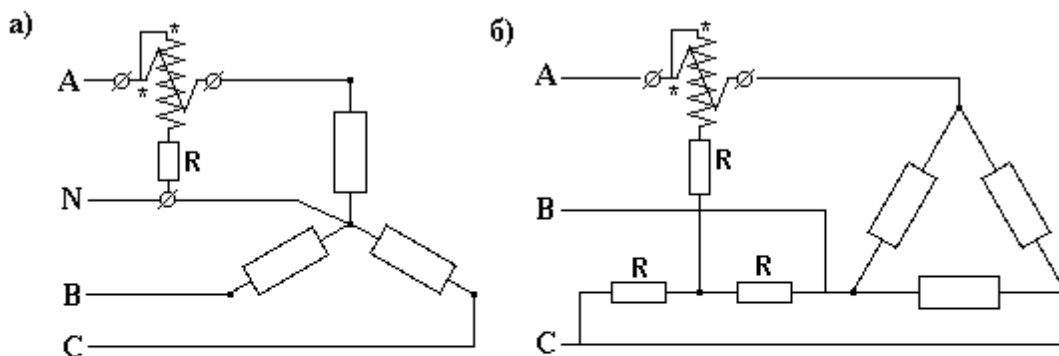


Рисунок 14 – Включення ватметра й лічильника електричної енергії для вимірювань у симетричних трифазних ланцюгах з доступною й недоступною нейтралю.

При недоступній нейтралі в симетричному трифазному ланцюзі, коли, наприклад, навантаження включене за схемою трикутника (мал. 14 б), роблять штучну нейтраль, як показано на малюнку. Для цього між фазами В и С включають послідовно два резистори, опір кожного з яких дорівнює опору паралельного кола приладу (ватметра або лічильника енергії). Точку їхнього з'єднання підключають до негенераторного затискача паралельного кола приладу. У результаті ця точка стає нейтралю, якщо, звичайно, навантаження симетричне.

Загальну потужність й енергію, споживану в трифазному ланцюзі, підраховують, множачи на 3 показання відповідних приладів.

4.9.3 Вимірювання реактивної електричної потужності й енергії в симетричних трифазних колах одним приладом

Крім активної потужності й енергії, що витрачає споживачами, дуже важливо контролювати реактивні компоненти потужності й енергії, на вироблення яких затрачаються дефіцитні енергоресурси, але не використовуються в чинність їхнього перетворення в марне для практичної реалізації електромагнітне випромінювання. При перевищенні норм,

встановлених на допущену долю цих реактивних компонентів, до споживачів пред'являються штрафні санкції.

Як відомо, реактивна потужність виражається формулою

$$P_{PE} = U_D I_D \cdot \sin \varphi = U_D I_D \cdot \cos(90^\circ - \varphi). \quad (40)$$

Із цього випливає, що для вимірювання реактивної потужності в однофазному ланцюзі або в кожній фазі трифазного кола окремо необхідно зрушити фазу в одному з ланцюгів ватметра або лічильника енергії на 90° . Практично це можна зробити тільки в паралельному ланцюзі даних приладів.

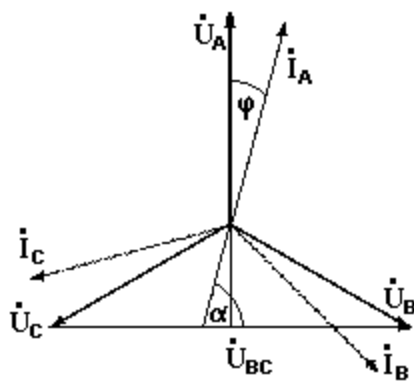


Рисунок 15 – До вимірювання реактивної потужності й енергії.

Але, якщо трифазний ланцюг симетричний, навантаження включене по схемі зірка, то в цьому випадку (див. векторну діаграму мал. 15):

- лінійні струми однакові по модулі й дорівнюють струмам у фазах,
- вектори лінійних напруг ортогональні векторам протилежних фазових напруг, наприклад, вектор $\dot{U}_{BC}$ ортогонален вектору $\dot{U}_A$,

- лінійні напруги однакові по модулю, їхні модулі більше модулів фазних напруг в $\sqrt{3}$, тобто $|\dot{U}_{BC}| = |\dot{U}_A| \cdot \sqrt{3}$,

- загальна споживана потужність й електрична енергія рівні потроєній фазовій потужності й, відповідно, потроєній фазовій енергії.

Тому при включенні ватметра по першій зі схем мал. 14 обертаючий момент, що діє на його рухому частину, пропорційний величині $(\dot{U}_{BC})_D (\dot{I}_A)_D \cdot \cos \alpha$, де α - кут між векторами $\dot{I}_A$ й $\dot{U}_{BC}$, $(\dot{U}_{BC})_D$ - діюче значення лінійної напруги $\dot{U}_{BC}$, $(\dot{I}_A)_D$ - діюче значення лінійного, у цьому випадку також і фазного струму $\dot{I}_A$.

Оскільки $|\dot{U}_{BC}| = \sqrt{3} \cdot |\dot{U}_A|$ й $\alpha = 90^\circ - \varphi$, то повна реактивна потужність трифазного кола буде дорівнює

$$P_{PE} = 3 \cdot (\dot{U}_A)_D (\dot{I}_A)_D \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot (\dot{U}_{BC})_D (\dot{I}_A)_D \cos \alpha. \quad (41)$$

Аналогічні виводи справедливі й для інших варіантів схем включення ватметра, показаних на мал. 16.

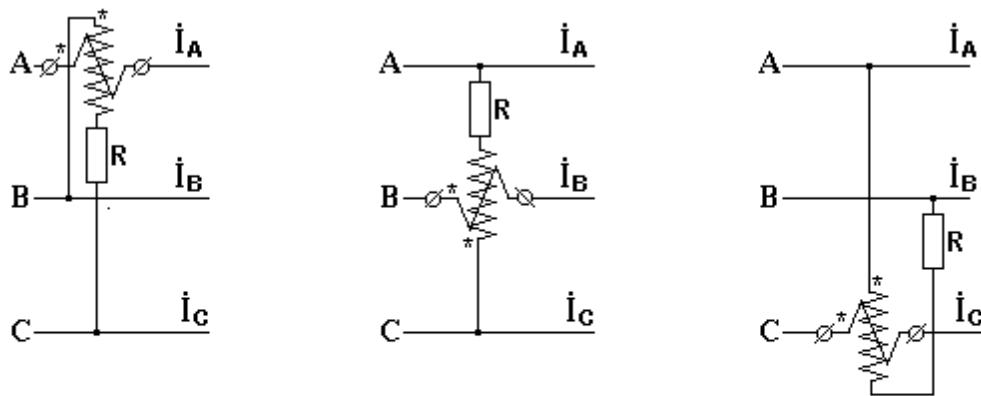


Рисунок 16 – Схеми включення одного приладу для вимірювання реактивної електричної потужності й енергії в симетричному трифазному ланцюгу.

Це означає, що для одержання результату вимірювання реактивної потужності, що розсіюється симетричним трифазним ланцюгом, досить помножити показання ватметра, включеного по кожному з варіантів, показаних на мал. 16, на $\sqrt{3}$.

Точно такі ж виводи й рекомендації відносяться до схем включення лічильників електричної енергії й до одержання результату вимірювання реактивної електричної енергії, що розсіює симетричним трифазним ланцюгом.

4.9.4 Вимірювання активної електричної потужності й енергії в трифазному ланцюзі за допомогою двох приладів

Використовуються наступні співвідношення між лінійними струмами й напругами.

Нехай $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ - лінійні струми у фазах А, В, С відповідно, і $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ - лінійні напруги між відповідними фазами. Відомо, що $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ й $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$. Потужність, виділювана, наприклад, у фазі А, дорівнює скалярному добутку векторів $P_A = \dot{U}_A \dot{I}_A$. Точно так само в інших фазах $P_B = \dot{U}_B \dot{I}_B$ й $P_C = \dot{U}_C \dot{I}_C$. Сумарна потужність, споживана навантаженням, дорівнює $P = \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B \dot{I}_B + \dot{U}_C \dot{I}_C$. Але $\dot{I}_C = -\dot{I}_A - \dot{I}_B$. Тому

$$P = \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B \dot{I}_B - \dot{U}_C \dot{I}_A - \dot{U}_C \dot{I}_B = \dot{I}_A (\dot{U}_A - \dot{U}_C) + \dot{I}_B (\dot{U}_B - \dot{U}_C).$$

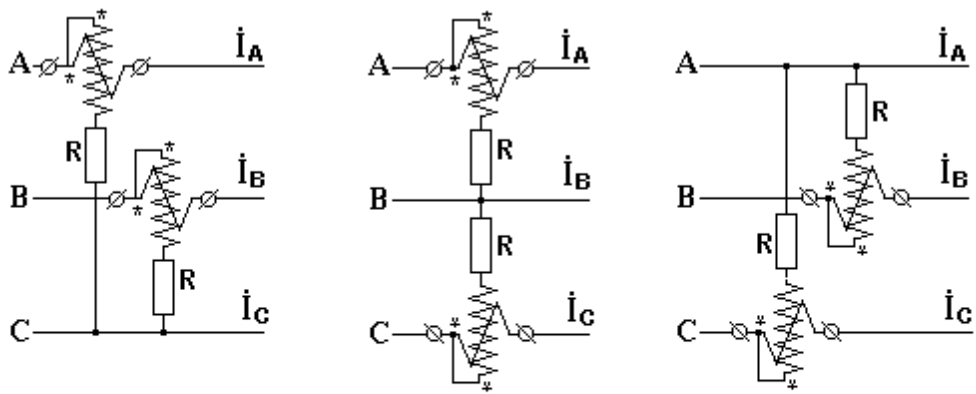


Рисунок 17 – Варіанти включення двох ватметрів й (або) лічильників активної потужності й електричної енергії в трифазних ланцюгах.

Різниці напруг $\dot{U}_A - \dot{U}_C$ і $\dot{U}_B - \dot{U}_C$ суть лінійні напруги $\dot{U}_{AC}$ й $\dot{U}_{BC}$ відповідно. У результаті одержуємо формулу

$$P = \dot{I}_A \dot{U}_{AC} + \dot{I}_B \dot{U}_{BC}, \quad (42)$$

яка виправдує перший варіант схеми мал. 17 приєднання двох приладів до ліній трифазного кола з метою виміру повної активної електричної потужності або енергії, споживаною навантаженням. Ця потужність або енергія обчислюється, як сума показань двох приладів.

Аналогічним образом доводиться правомірність інших варіантів схем, які показані на тім же малюнку.

Розглянуті схеми реалізуються в трифазних лічильниках електричної енергії, у корпусі яких розміщені два механізми, показаних на мал. 17. Обидва диски розташовані на одній осі, завдяки чому обертаючі моменти, створювані кожною парою електромагнітів, підсумуються відповідно до формули (42).

4.10 Запитання для самоконтролю.

1. Прилади магнітоелектричної системи
2. Прилади електродинамічної системи
3. Прилади феродинамічної системи
4. Прилади електромагнітної системи
5. Прилади електростатичної системи
6. Прилади індукційної системи
7. Засоби розширення меж вимірювання й правила вибору відповідної межі
8. Застосування аналогових приладів для вимірювань у трифазних колах змінного струму

5 МОСТОВІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Мостові методи вимірювання й перетворення параметрів елементів електричних кіл (опору, індуктивності і ємності) широко застосовуються як для вимірювання цих параметрів, так і для створення на їхній основі вимірювальних перетворювачів вимірювальних інформаційних систем (BIC).

Будуть розглянуті мости постійного і змінного струму, що працюють у рівноважному й нерівноважному режимах.

5.1 Мости постійного струму

5.1.1 Мости постійного струму в рівноважному режимі

Мости постійного струму, що працюють у рівноважному режимі (надалі - *рівноважні мости*), належать до засобів вимірювання порівняння й призначені для вимірювання опору. Схема рівноважного моста постійного струму наведена на мал. 18 а). Цей міст називається *одинарним мостом* і призначений для вимірювання опорів від одиниць Ом до 10^{14} Ом. Для вимірювання малих опорів від 10^{-4} до 50 Ом застосовується *подвійний міст*, схема якого представлена на мал. 18 б).

Розглянемо спочатку властивості одинарного моста. Вимірюваний опір R_x включається в одне із плечей моста, і процес вимірювання полягає в тім, що зміною опору, що стоїть в іншому плечі, наприклад, опору R_1 , добиваються рівноваги моста, тобто такого стану, при якому в діагоналі моста ВР струм не йде. Для індикації цього стану в діагональ ВР, називану *вимірювальною діагоналлю*, включається високочутливий мікроамперметр, що виконує функцію нуль-індикатора (НІ). Ключ К призначений для короткочасного включення нуль-індикатора в діагональ, оскільки при значній відмінності від рівноваги тривале включення НІ може призвести до виходу його з ладу.

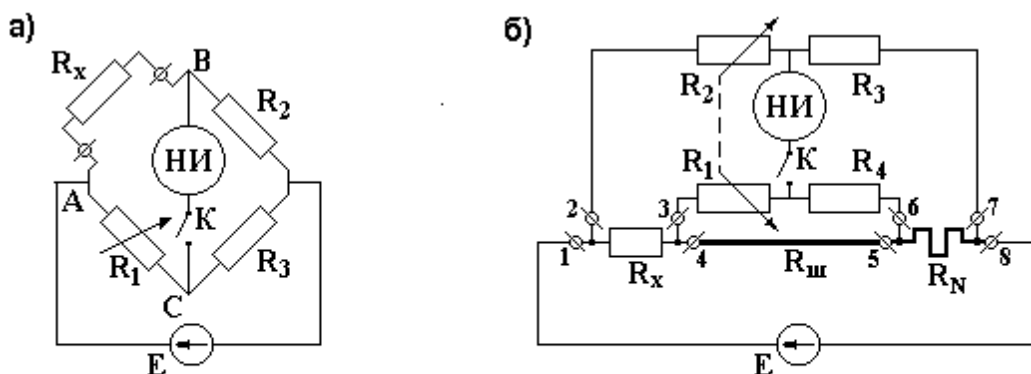


Рисунок 18 – Одинарний і подвійний мости постійного струму.

Рівновага моста наступить тоді, коли падіння напруг на плечах АВ й АС зрівняються, тобто, коли

$$E \frac{R_x}{R_2 + R_x} = E \frac{R_1}{R_1 + R_3}, \quad (43)$$

де E - напруга живлення моста.

Із цієї рівності треба

$$R_x(R_1 + R_3) = R_1(R_2 + R_x), \quad (44)$$

звідки одержуємо умову відсутності струму у вимірювальній діагоналі, тобто умову рівноваги моста

$$R_x R_3 = R_1 R_2. \quad (45)$$

Значення опорів R_1, R_2, R_3 відоме, тому значення вимірюваного опору обчислюється по формулі

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}. \quad (46)$$

Звичайно в серійних мостах з ручним зрівноважуванням опору R_2, R_3 підбираються так, щоб відношення $R_2 / R_3 = 10^k$, де k - ціле число, позитивне, негативне або 0. Тим самим забезпечується зручність відлічування значення вимірюваного опору в десятковому коді по шкалі значень регульованого опору R_1 . У мостах з автоматичним зрівноважуванням під управлінням комп'ютера відношення $R_2 / R_3 = 2^k$.

Як виходить з (44), (45), умови рівноваги не залежать від напруги живлення моста. Але це не означає, що ця напруга може бути як завгодно малою, оскільки при зменшенні напруги живлення зменшується чутливість

моста, тобто при обмеженій чутливості нуль-індикатора зростає невизначеність у визначенні стану рівноваги, а це, у свою чергу, приводить до зростання адитивної погрішності результату вимірювань. Тому з метою збільшення чутливості моста варто підвищувати напругу живлення. Однак, при цьому зростають струми, опори нагріваються цими струмами, і їхні значення змінюються, у результаті чого зростає погрішність вимірювань. Тому підвищувати напругу живлення можна тільки до рівня, при якому перегрів опорів плечей не приводить до росту погрішності, викликаній цим перегрівом. Крім того чутливість моста залежить від співвідношення опорів плечей. Максимальною чутливістю володіє рівноплечий міст, тобто міст, у якого значення опорів плечей однакові.

Істотні труднощі виникають при необхідності вимірювань малих опорів, значення яких становлять одиниці й долі Ом. Подібними опорами володіють потужні електричні двигуни й генератори, трансформатори й інші агрегати.

Ці труднощі викликані наступними обставинами:

- якщо вимірюваний опір становить десяті й соті долі Ом, то для того, щоб спадання напруги на плечі АВ моста досягло одиниць вольтів, необхідно пропустити через нього струм порядку десятків і сотень ампер відповідно, але при цьому опір R_2 також повинне бути малим, тому що в протилежному випадку на ньому буде виділятися неприпустимо велика потужність,

- для забезпечення прийнятної чутливості моста необхідно, щоб опори R_1, R_3 мали значення одного порядку зі значеннями опору R_x ,

- погрішність регулювання й відлічування значень опору R_1 , рівного десятій і сотій долям Ом, неприпустимо велика через вплив нестабільного опору контактів і сполучних проводів, значення яких можуть навіть перевищувати значення вимірюваної напруги.

Тому для зазначеної мети одинарний міст непридатний, і для вимірювання малих опорів застосовується подвійний міст, схема якого представлена на мал. 18 б).

Великий струм, необхідний для створення значної напруги на вимірюваному опорі, пропускається по колу '1, 4, 5, 8'. У цьому колі включений зразковий високоточний опір R_N , значення якого порівнянне зі значенням вимірюваного опору, і в нього включається вимірюваний опір. Ці два опори з'єднані товстою мідною шиною з мізерно малим опором. Контакти

'1, 4, 5, 8' - струмові контакти опорів, контакти '2, 3, 6, 7' - потенційні контакти (затискачі). Про меті поділу контактів на струмові й потенційні див. п. 4.8.2.

При досягненні рівноваги моста

$$R_x = R_N \frac{R_2}{R_3} - \frac{R_{ii} R_4}{R_{ii} + R_1 + R_4} \left(\frac{R_1}{R_4} - \frac{R_2}{R_3} \right). \quad (47)$$

Джерела погрішностей вимірювань, виконуваних рівноважними мостами:

- обмежена чутливість нуль-індикатора, породжує адитивну погрішність вимірювань,

- погрішності у виготовленні резисторів моста, у тому числі погрішність регульованого резистора, нестабільність контактів перемикачів регульованого резистора викликають мультиплікативну погрішність вимірювань.

Метрологічні характеристики рівноважних мостів наведені в п. 5.3. Основна погрішність рівноважних мостів нормується, як відносна погрішність.

5.1.2 Мости постійного струму в нерівноважному режимі

Мости постійного струму, що працюють у нерівноважному режимі, застосовуються, як вимірювальні перетворювачі опору (або зросту опору) у постійний струм або в напругу.

Принцип дії й призначення нерівноважних мостів розглянемо на двох прикладах мостів, опори плечей яких при рівновазі однакові. Схеми цих мостів наведені на мал. 19. Будемо також вважати, що у вимірювальну діагональ включений великий опір навантаження (наприклад, опір вольтметра або вхідний опір підсилювача), істотно перевищуючий опори плечей моста: $R_H \gg R$.

У першому варіанті, представленому на мал. 19 а), опір, приріст якого ΔR необхідно перетворити у відповідну зміну напруги, включений в одне із плечей моста. Очевидно, що при $\Delta R = 0$ міст урівноважений, і напруга U_{21} в його вимірювальній діагоналі між точками 2 й 1 також дорівнює 0. При зміні цього опору напруга у вимірювальній діагоналі буде змінюватися відповідно до функції перетворення:

$$U_{21}(\Delta R) = U_{23} - U_{13}(\Delta R) = \frac{E}{2} - \frac{E \cdot R}{R + R + \Delta R} = E \frac{\Delta R}{4R \left(1 + \frac{\Delta R}{2R} \right)}. \quad (48)$$

Позначимо відносний приріст опору через ε , тоді

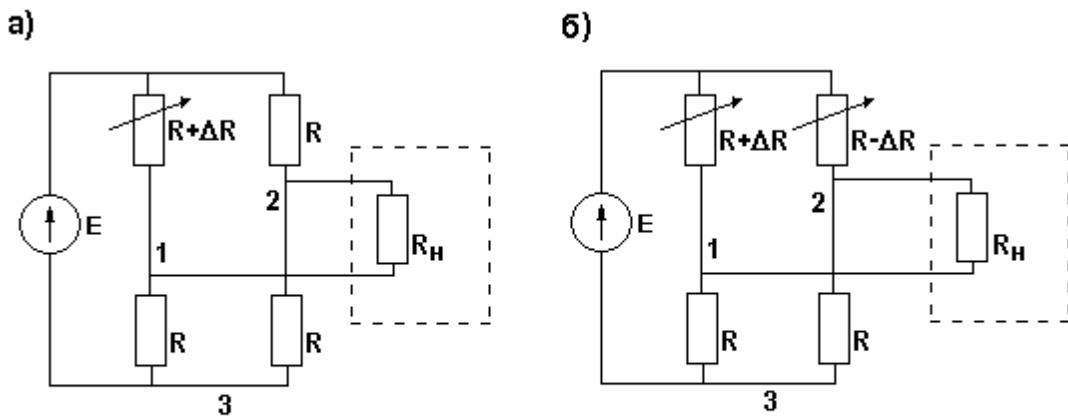


Рисунок 19 – Мости постійного струму в нерівноважному режимі.

$$U_{21}(\varepsilon) = E \frac{\varepsilon}{4\left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right)}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta R}{R}. \quad (49)$$

У ряді випадків може представитися можливість диференціального включення змінних опорів у різні плечі моста, як це показано на мал. 19 б. При такому включенні чутливість такого перетворювача подвоюється, і функція перетворення має вигляд:

$$U_{21}(\Delta R) = U_{23}(\Delta R) - U_{13}(\Delta R) = \frac{E \cdot R}{2R - \Delta R} - \frac{E \cdot R}{2R + \Delta R} = E \frac{\Delta R}{2R \left[1 - \left(\frac{\Delta R}{2R}\right)^2\right]}.$$

Функція перетворення відносного приросту опору в напругу є

$$U_{21}(\varepsilon) = E \frac{\varepsilon}{2\left(1 - \frac{\varepsilon^2}{4}\right)}. \quad (50)$$

З виражень для функцій перетворення (49) і (50) видно, що:

- нерівновагий міст може застосовуватися як вимірювальний перетворювач приросту опору в напругу,
- у загальному випадку функція перетворення не є лінійною,
- погрішність перетворення породжується нестабільністю напруги живлення моста, а також погрішністю виготовлення й нестабільністю опорів плечей.

Метрологічні характеристики нерівновагих мостів наведені в п. 5.3. Для тензорезистивних мостів, функція перетворення яких лінійна, нормується

відносна погрішність двочленною формулою. Якщо нелінійність нерівноважного моста проявляється значно, для них нормується приведена основна погрішність.

5.2 Мости змінного струму

5.2.1 Умови рівноваги мостів змінного струму

Мости змінного струму призначені для вимірювання комплексних опорів елементів електричних схем. Тому напруга живлення цих мостів - змінна, а плечі моста суть комплексні опори, як це показано на мал. 20 а). На мал.20 б) і в) показані схеми мостів окремого виду, призначені для вимірювання ємності конденсатора (мал. 20 б) і індуктивності котушки (мал. 20 в).

Умова рівноваги мостів змінного струму виводиться за аналогією з виводом умови рівноваги мостів постійного струму (п. 5.1.1) і в остаточному підсумку виражається рівністю

$$Z_x Z_3 = Z_1 Z_2, \quad (51)$$

де Z_x - вимірюваний комплексний опір (імпеданс), Z_1, Z_2, Z_3 - комплексні опори - плечі моста.

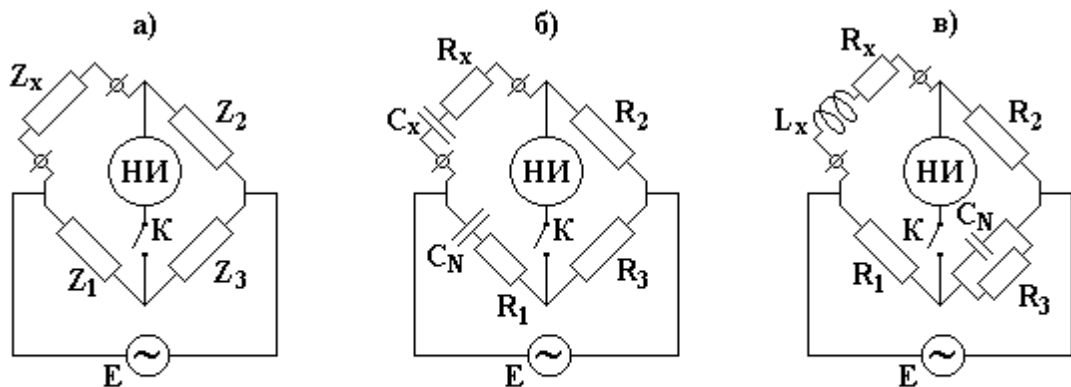


Рисунок 20 – Мости змінного струму.

Застосовуючи експонентне представлення комплексних чисел, перепишемо цю умову у вигляді:

$$|Z_x|e^{j\varphi_x} \cdot |Z_3|e^{j\varphi_3} = |Z_1|e^{j\varphi_1} \cdot |Z_2|e^{j\varphi_2}. \quad (52)$$

По ознаці рівності комплексних чисел, цій рівності відповідає система двох рівностей

$$\begin{cases} |Z_x| \cdot |Z_3| = |Z_1| \cdot |Z_2| \\ \varphi_x + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2 \end{cases} \quad (53)$$

Це означає, що врівноважувати міст змінного струму необхідно по двох компонентах: по модулю й фазі. Для контролю стану рівноваги моста необхідно застосовувати фазочутливий нуль-індикатор, що дозволяє фіксувати не тільки зміни амплітуди струму у вимірювальній діагоналі, так й інверсію фази цього струму, яка відбувається при переході через положення рівноваги.

5.2.2 Міст змінного струму для вимірювання ємності конденсатора

При вимірюванні ємності конденсатора необхідно мати у виді, що будь-який конденсатор не є ідеальним, його опір змінному струму є комплексним через втрати активної потужності, що виникає в силу недосконалості ізоляції, що знаходиться між пластинами. У зв'язку із цим, а також відповідно до загальної процедури підготовки й проведення вимірювань необхідно спочатку сформулювати математичну модель об'єкта вимірювань, у цьому випадку - конденсатора, як комплексного опору змінному струму.

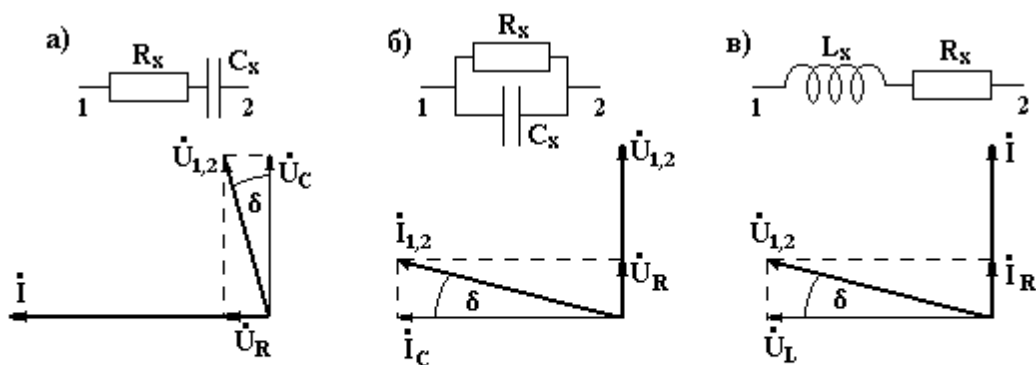


Рисунок 21 – Схеми заміщення реального конденсатора й індуктивності.

Така математична модель в електротехніці називається схемою заміщення. Залежно від розміру втрат активної потужності на практиці використовується одна із двох схем заміщення: для конденсаторів з малими втратами - схема мал. 21 а), для конденсатора з більшими втратами - схема мал. 21 б). Опір R_x у цих

схемах називається *опором втрат*. У різних схемах заміщення реального конденсатора опір втрат і навіть ємностей будуть розрізнятися. Як показник активних втрат конденсатора, що не залежить від схеми заміщення, використовується тангенс кута δ . Цей кут є відмінність зсуву по фазі між векторами струму й напруги, внесеного реальним конденсатором, від кута 90° .

Приклад схеми моста, призначеного для вимірювання параметрів схеми заміщення конденсатора з малими втратами, наведений на мал. 21 б). У цій схемі в одне із плечей моста включений конденсатор C_N , ємність якого відома з високою точністю, погрішність, з якою відома ємність C_N , і втрати зневажливо малі.

Для виводу умов рівноваги моста скористаємося формулою (51):

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x}\right) \cdot R_3 = \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_N}\right) \cdot R_2, \quad (54)$$

звідки, по ознаці рівності комплексних чисел, виходить:

$$R_x R_3 = R_2 R_1, \quad \frac{R_3}{C_x} = \frac{R_2}{C_N}, \quad (55)$$

і, нарешті, при досягненні рівноваги результати вимірювань обчислюються по формулах

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}, \quad C_x = C_N \frac{R_3}{R_2}. \quad (56)$$

Привабливою властивістю такого моста є можливість його зрівноважування по обох складових за допомогою активних опорів. У якості одного з регульованих опорів треба, безперечно, вибрати R_1 , а в якості іншого - R_2 або R_3 .

Джерела погрішностей вимірювань за допомогою рівноважних мостів змінного струму наведені нижче в наступному пункті. Метрологічні характеристики наведені в п. 5.3.

5.2.3 Міст змінного струму для вимірювання індуктивності котушки

Математичною моделлю котушки, як комплексного опору змінному електричному струму, є схема заміщення, наведена на мал. 21 в). Опором втрат тут є активний опір дроту, яким намотана котушка.

Приклад схеми моста для вимірювання параметрів схеми заміщення котушки індуктивності наведений на мал. 21 в).

Для виводу умов рівноваги моста скористаємося формулою (51):

$$(R_x + j\omega L_x) \cdot \left(\frac{R_3}{1 + j\omega R_3 C_N} \right) = R_1 \cdot R_2. \quad (57)$$

Після приведення до загального знаменника одержимо:

$$R_3 \cdot (R_x + j\omega L_x) = R_1 \cdot R_2 \cdot (1 + j\omega R_3 C_N), \quad (58)$$

звідки, по ознаці рівності комплексних чисел, треба:

$$R_x R_3 = R_2 R_1, \quad \omega \cdot L_x = \omega \cdot R_1 R_2 C_N, \quad (59)$$

і, нарешті, при досягненні рівноваги результати вимірювань обчислюються по формулах

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}, \quad L_x = R_1 R_2 C_N. \quad (60)$$

Привабливою властивістю такого моста є можливість його зрівноважування по обох складових за допомогою активних опорів. У якості одного з регульованих опорів треба, безперечно, вибрати R_1 , а в якості іншого - R_2 .

Джерела погрішностей вимірювань, виконуваних рівноважними мостами змінного струму:

- обмежена чутливість нуль-індикатора, породжує адитивну погрішність вимірювань,
- погрішності у виготовленні резисторів моста, у тому числі погрішність регульованого резистора, погрішність виготовлення конденсатора C_N , відмінність від нуля його опору втрат, нестабільність контактів перемикачів регульованого резистора викликають мультиплікативну погрішність вимірювань.

Метрологічні характеристики мостів наведені в наступному пункті.

5.3 Метрологічні характеристики мостів

Адитивна складова погрішності мостів, що працюють у рівноважному режимі, викликана дією тільки одного фактора, а саме, обмеженою чутливістю нуль - органа. Вплив цього фактора на загальну погрішність моста може бути

зроблений зневажливо малим у порівнянні з погрішністю, породженою неточністю виготовлення резисторів й інших комплектуючих, тобто мультиплікативної складової погрішності. Тому нормованою характеристикою погрішності мостів є межа допущеної основної відносної погрішності.

В зв'язку з викладеним метрологічними характеристиками рівноважних мостів є:

- діапазон зміни вимірюваної величини,
- характеристика основної відносної погрішності,
- характеристики додаткових погрішностей.
- напруга живлення моста.

У тих випадках, коли

- напруга в діагоналі моста лінійно залежить від зміни параметрів цього моста,

- коли до складу подібного моста включений лінійний підсилювач сигналу вимірювальної діагоналі,

- і цей підсилювач володіє власною адитивною і мультиплікативною погрішністю, тоді характеристика основної відносної погрішності нормується двочленною формулою (див. п. 3.6):

$$\gamma \leq c + d \left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \%. \quad (61)$$

У таких випадках клас точності подібного складеного засобу вимірювань позначається через коефіцієнти двочленної формули: c/d .

Нерівноважні мости являють собою, по суті справи, вимірювальні перетворювачі. Їхній вихідний сигнал y , стало бути, погрішність залежить не тільки від зміни вимірюваної величини x від погрішності виготовлення опорів плечей моста, але й від напруги живлення. У чинність нелінійності функції перетворення більшості мостів, що працюють у нерівноважному режимі при великих змінах опору, для них нормується основна приведена погрішність (див. п. 3.1). Виключення становлять нерівноважні мости, плечі яких утворюють тензорезистори. Відносна зміна опору тензорезисторів невелика, і такі мости можуть уважатися лінійними з великим ступенем точності.

5.4 Запитання для самоконтролю.

1. Мости постійного струму
2. Мости постійного струму в рівноважному режимі

3. Мости постійного струму в нерівноважному режимі
4. Мости змінного струму
5. Умови рівноваги мостів змінного струму
6. Міст змінного струму для вимірювання ємності конденсатора
7. Міст змінного струму для вимірювання індуктивності котушки
8. Метрологічні характеристики мостів

6 ЦИФРОВІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

6.1 Цифроаналогові перетворювачі

Прикладом найпростішого цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) десятичного коду в аналогову величину може служити шостидекадний магазин опорів з ручним керуванням. Ціна одиниці молодшої декади 0.1 Ом. Вихідною величиною цього ЦАП є опір постійному струму, що відповідає десятичному числу

$$N = (a_0 10^0 + a_1 10^{-1} + a_2 10^{-2} + a_3 10^{-3} + a_4 10^{-4} + a_5 10^{-5}) \cdot 10^4, \quad (62)$$

де коефіцієнти $a_i, i = 0, 1, \dots, 5$ приймають значення від 0 до 9 і встановлюються вручну шляхом перемикання декад магазину. Діапазон зміни вихідної величини (опору) 0 - 99999.9 Ом.

Сучасні ЦАП з керуванням від ЕОМ (процесора) перетворюють в аналогову величину (напругу, силу струму, опір, ємність і т.д.) двійкові числа. Спрощена схема подібного перетворювача представлена на мал. 22. Напруга на виході цього ЦАП дорівнює

$$U_{\text{вих}} = 2 \cdot I_0 R \cdot (a_0 2^0 + a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_m 2^{1-m}) \text{ В.} \quad (63)$$

де $a_i, i = 0, 1, \dots, m-1$ - коефіцієнти, що приймають значення 0 й 1. Ці коефіцієнти реалізуються включенням і вимиканням ключів під управлінням комп'ютера відповідно до *програми -драйвера*.

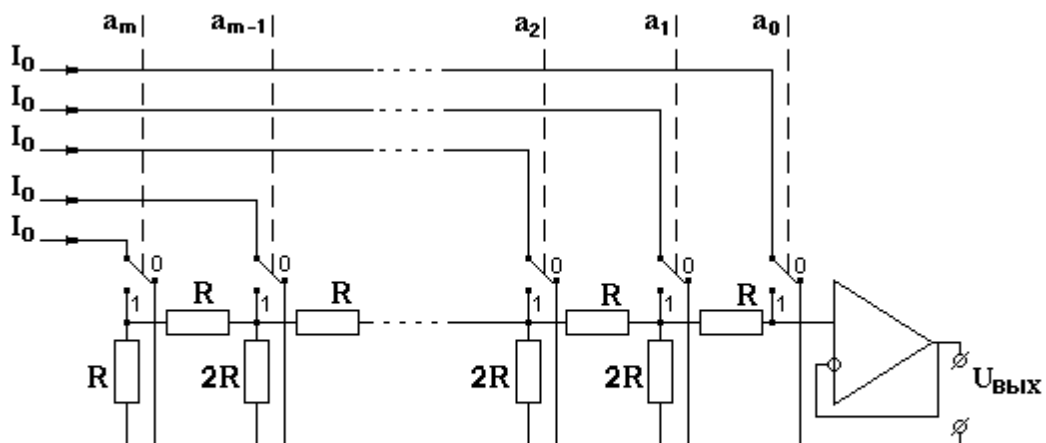


Рисунок 22 – Принцип дії цифроаналогового перетворювача.

Для зв'язку з комп'ютером застосовується один зі стандартних інтерфейсів. Любий з інтерфейсів являє собою сукупність

- правил обміну інформацією (протокол обміну),
- стандартів на параметри інформаційних і службових сигналів,
- стандартів на конструкції сполучних пристроїв.

Конструктивно ЦАП може бути оформлений у вигляді однієї мікросхеми, що у мінімальному составі може містити тільки ланцюжок опорів, ключі й підсилювач. Однак такий состав не дає можливості нормувати метрологічні характеристики, а тому подібні мікросхеми не можуть виконувати функції засобу вимірювань. Тому ЦАП, що може вважатися засобом вимірювань, повинен містити у своєму составі крім показаного на мал. 22, як мінімум слідує обов'язкові компоненти: джерело стабільного робочого струму I_0 й стабілізатор напруги живлення. Крім цього в кожному ЦАП, призначеному для спільної роботи з комп'ютером (процесором) повинне бути передбачене пристрій інтерфейсного сполучення з комп'ютером і пристрій гальванічної розв'язки по цифровому входу/виходу.

Джерелами погрішності ЦАП є: неточність виготовлення опорів, нестабільність робочого струму й нестабільність живлення. Крім того при перемиканнях ключів виникають перехідні процеси. Тому потрібна затримка на час загасання цих процесів між моментом подачі вхідного коду й моментом зчитування значення вихідного сигналу.

Метрологічні характеристики ЦАП.

1. Кількість розрядів.

2. Діапазон зміни вихідного сигналу.
3. Характеристики основної погрішності.
4. Характеристики додаткових погрішностей.
5. Ціна одиниці молодшого розряду вхідного коду.
6. Час установлення вихідного сигналу при зміні вхідного коду.
7. Вихідний опір.

Крім перерахованих можуть додатково нормуватися наступні характеристики.

8. *Інтегральна нелінійність* - максимальне відхилення значень функції перетворення ЦАП від номінальної лінійної функції, нормується в % від верхнього значення вихідного сигналу.

9. *Диференціальна нелінійність* - погрішність одиниці молодшого розряду вхідного коду, нормується в % від верхнього значення вихідного сигналу.

У рідких випадках для контролю роботи ЦАП може бути передбачена індикація вхідних кодів. Для цієї мети служать дешифратор й індикатор.

Застосування ЦАП:

- при побудові аналого - цифрових перетворювачів,
- при побудові калібраторів постійного і змінного струму й напруги, опору, сили струму, ємності, індуктивності й ін.,
- при побудові систем регулювання й моделювання,
- у техніці відтворення цифрового запису звуку й відеозображення.

Іноді ЦАП може застосовуватися як добутковий пристрій для перемножування значення сили струму I_0 на вхідний код.

6.2 Аналого - цифрові перетворювачі

6.2.1 АЦП порозрядного зрівноважування

АЦП порозрядного зрівноважування, принцип дії якого пояснюється мал. 23, є досить популярним. При запуску АЦП компаратор починає порівнювати вхідну (перетворювану) напругу з напругою, що надходить із виходу ЦАП, яка у початковий момент дорівнює 0. Компаратор виробляє сигнал “більше”, по якому пристрій керування встановлює значення коефіцієнта $a_0 = 1$, тим самим встановлюючи старший розряд ЦАП в ‘1’. Після цього компаратор знову

порівнює вхідну напругу U_x з напругою, що надходить із виходу ЦАП. Якщо вхідна напруга знову виявляється більше напруги із ЦАП, то компаратор знову виробляє сигнал "більше", і пристрій керування встановлює коефіцієнт $a_1 = 1$, тим самим включається наступний розряд ЦАП. У протилежному випадку, якщо вимірювана напруга виявляється менше, ніж напруга ЦАП, той пристрій керування встановлює $a_0 = 0, a_1 = 1$. Такі операції повторюються доти, поки не будуть опитані всі розряди ЦАП. По закінченні процедури у всіх лініях, що йдуть від пристрою керування до ЦАП, формуються коефіцієнти $a_0, a_1, \dots, a_m$ у вигляді наявності або відсутності напруги в кожній з них. Отримані коефіцієнти, тобто двійковий код переписується у вихідний регістр і далі, відповідно до протоколу обміну - у комп'ютер (процесор).

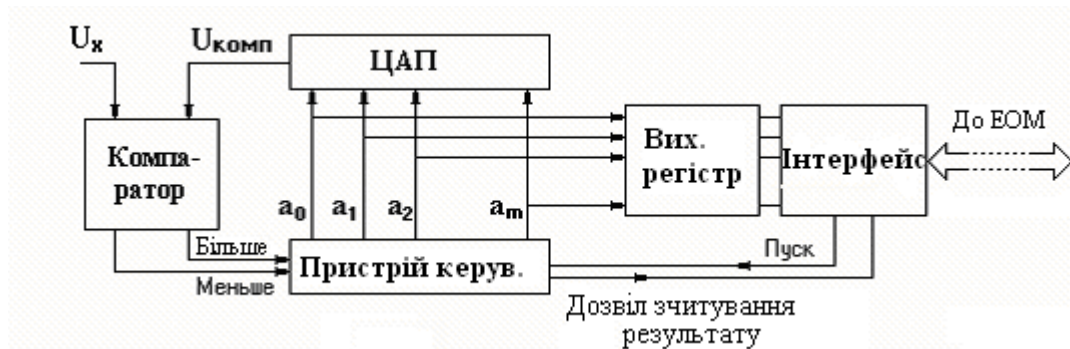


Рисунок 23 – Принцип дії аналого-цифрового перетворювача порозрядного зрівноважування.

Основна погрішність таких АЦП визначається:

- кінцевою чутливістю компаратора, погрішностями виготовлення опорів у ЦАП й обмеженою кількістю розрядів - адитивна складова погрішності,
- погрішністю робочого струму ЦАП - мультиплікативна складова погрішності.

Тому в загальному випадку основна погрішність АЦП порозрядного зрівноважування нормується гранично допущеною відносною погрішністю, яка виражається двочленною формулою.

Динамічною характеристикою АЦП порозрядного зрівноважування є тривалість циклу перетворення або зворотна величина - частота перетворення. Погрішність датування відліків або апертурний час таких АЦП не перевищує тривалості циклу перетворення.

У цей час АЦП порозрядного зрівноважування мають наступні гранично досяжні характеристики: максимальна частота вимірювань від 50 Гц (при 24 двійкових розрядах) до 400 МГц (при 8 двійкових розрядах).

6.2.2 АЦП розгортаючого перетворення

АЦП розгортаючого перетворення являє собою, по суті справи, два послідовно включених перетворювачі: один перетворює напругу в інтервал часу, другий - інтервал часу в код.

Принцип дії АЦП пояснюється на мал. 24.

На вхід компаратора подаються: вхідна напруга U_x , підлягаюча перетворенню, і періодична лінійно наростаюча напруга $u(t) = U_{max}(t - t_1 + kt_{nep})$, $t_1 \leq t \leq t_{max}$, де t_{max} задовольняє умові $u(t_{max}) = U_{max}$, t_{nep} - період. Компаратор виробляє імпульси: імпульс I_1 - у момент t_1 початку лінійної напруги, і імпульс I_2 - у момент t_2 , коли напруга $u(t)$ порівнюється з напругою U_x .

У такий спосіб виконується перша ступінь перетворення, а саме, перетворення U_x в інтервал часу $T = t_2 - t_1$.

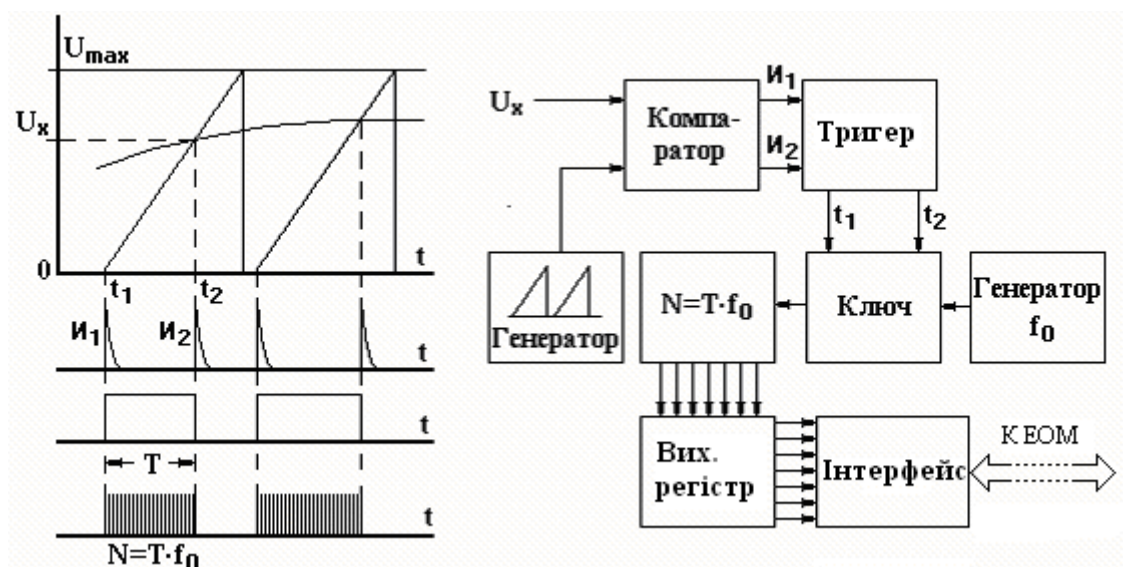


Рисунок 24 – Принцип дії АЦП розгортаючого перетворення.

Точно на цей час відкривається ключ і пропускає крізь себе імпульси стабілізованої частоти f_0 від генератора цієї частоти в лічильник. У лічильнику формується код (двійковий або десятковий - залежно від пристрою лічильника),

що надходить у вихідний регістр і далі через пристрої інтерфейсу в комп'ютер. Оскільки тривалість інтервалу часу прямо пропорційна вхідній напрузі, кількість цих імпульсів дорівнює

$$N = T \cdot f_0 = K \cdot f_0 \cdot U_x. \quad (64)$$

Основна погрішність подібних АЦП визначається якістю лінійно наростаючої напруги, зокрема, погрішністю відтворення коефіцієнта його нахилу K , а також кінцевою чутливістю компаратора, його шумами. У чинність високої точності відтворення частоти мультиплікативна погрішність, викликана нестабільністю частоти f_0 , звичайно зневажливо мала. Погрішність коефіцієнта нахилу K також викликає мультиплікативну погрішність, інші джерела породжують адитивну складову погрішності, і основна відносна погрішність АЦП розгортаючого перетворення нормується двочленною формулою.

Тривалість циклу перетворення АЦП розгортаючого перетворення дорівнює періоду пилоподібної напруги, а частота перетворення - частоті цієї напруги. Погрішність датування відліків таких АЦП не перевищує тривалості циклу перетворення.

6.2.3 АЦП “частота - код”

АЦП подібного виду являють собою основу для побудови цифрових частотомірів, а також самостійних АЦП, призначених для уведення частоти або сигналів, модульованих по частоті, у комп'ютер. Принцип дії цього АЦП заснований на визначенні частоти, як кількості імпульсів (або кількості періодів періодичного сигналу) в одиницю часу, і пояснюється на мал. 25.

Із вхідного періодичного сигналу (наприклад, синусоїди, як показано на мал. 25) формувач утворить послідовність імпульсів, частота яких дорівнює частоті вхідного сигналу. Ключ відкривається на певний

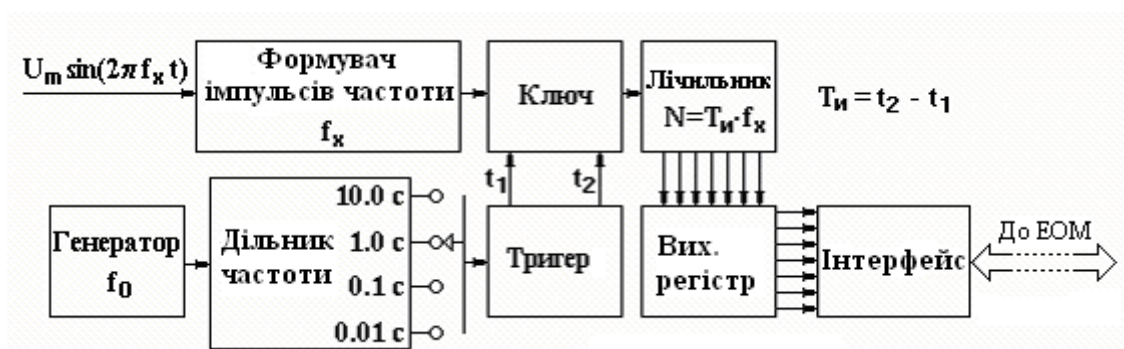


Рисунок 25 – Принцип дії перетворювача «частота-код».

час, що задається генератором стабільної частоти f_0 й дільником частоти. Дільник частоти виконаний перемикаючим із тим, щоб мати можливість змінювати час вимірювань T_u залежно від вимірюваної частоти й бажаної точності результату.

Лічильник накопичує минулі крізь ключ імпульси в кількості $N = T_u \cdot f_x$ й тим самим формує код, двійковий або десятковий - залежно від його пристрою. Двійковий код передається потім у вихідний регістр і далі через пристрої інтерфейсу, постачені гальванічною розв'язкою, - у комп'ютер.

Оскільки в даному АЦП вимірювання виконується за допомогою рахунку імпульсів, неминуча абсолютна погрішність вимірювання, рівному одному імпульсу. Відносне значення цієї погрішності дорівнює відношенню періоду вимірюваної частоти $T_x = 1 / f_x$ до часу вимірювання T_u , тобто $1 / (T_u \cdot f_x)$.

Якщо при цьому під час вимірювання T_u вимірювана частота змінювалася, то результатом вимірювання буде середнє значення частоти за цей час.

В остаточному підсумку погрішність подібного АЦП викликається наступними причинами:

- нестабільністю частоти генератора f_0 , що задає час вимірювань,
- співвідношенням між вимірюваною частотою f_x й часом вимірювання T_u .

Для таких АЦП нормується основна відносна погрішність межею допущених значень:

$$\gamma \leq \left(\gamma_{f_0} + \frac{1}{f_x T_u} \right) \cdot 100\%, \quad (65)$$

де γ_{f_0} - відносна погрішність (нестабільність) частоти f_0 .

Динамічною характеристикою АЦП "частота - код" є час вимірювання. Погрішність датування відліків подібних АЦП не перевищує часу вимірювання.

6.2.4 АЦП “інтервал часу - код”

АЦП даного типу застосовуються для перетворення в код інтервалу часу між двома імпульсами або тривалості імпульсів. У тому числі подібні АЦП можуть використовуватися для перетворення в код періоду періодичного

сигналу з подальшим обчисленням частоти цього сигналу, як величини, зворотної періоду. Таке перетворення займає набагато менше часу, чим перетворення частоти в код, описане вище в п. 6.2.3. Принцип дії подібного АЦП показаний на мал. 26.

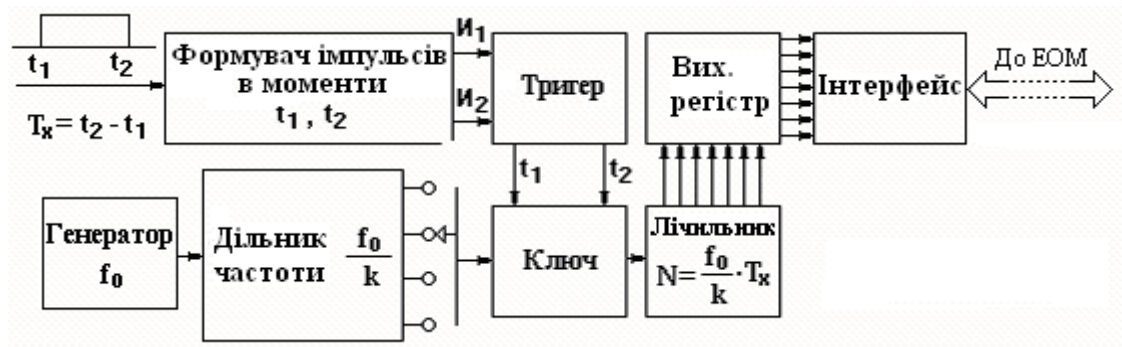


Рисунок 26 – Принцип дії перетворювача «інтервал часу - код».

У моменти t_1, t_2 початку й закінчення інтервалу часу, що підлягає вимірюванню, формувач виробляє імпульси, які надходять на вхід тригера, що відкриває ключ на час $T_x = t_2 - t_1$. За цей час ключ пропускає на лічильник $N = \frac{f_0}{k} T_x$ імпульсів від дільника стабільної частоти, і в цьому лічильнику формується код, що потім передається у вихідний регістр і далі через інтерфейсне сполучення й гальванічну розв'язку - у комп'ютер.

Походження погрішностей цього АЦП ті ж, що й у п. 6.2. 3. Абсолютна погрішність рахунку імпульсів частоти, що заповнює вимірюваний інтервал, дорівнює одному імпульсу. Відносна погрішність дорівнює відношенню періоду частоти $T_0 = \frac{k}{f_0}$ інтервалу часу T_x , тобто $\frac{k}{f_0 T_x}$. Тому для таких АЦП нормується основна відносна погрішність:

$$\gamma \leq \left(\gamma_{f_0} + \frac{k}{f_0 \cdot T_x} \right) \cdot 100\%. \quad (66)$$

Тривалість циклу перетворення такого АЦП дорівнює тривалості вимірюваного інтервалу часу, і погрішність датування відліків її не перевищує. Щодо цього застосування подібних АЦП для вимірювання частоти шляхом вимірювання періоду переважніше, ніж застосування АЦП "частота - код".

6.2.5 Інтегруючі АЦП

Інтегруючі АЦП призначені для перетворення в код повільно мінливої напруги із придушенням перешкод від мережі живлення. Із цією метою першою дією таких АЦП є інтегрування вхідної напруги протягом цілої кількості періодів перешкоди. У цей час на вхід інтегратора подається вимірювана напруга (див. мал. 27). Якщо запуск АЦП відбувся в момент часу t_1 , то момент закінчення інтегрування є $t_2 = t_1 + n \cdot T$, де T - період напруги перешкоди.

Оскільки частота напруги мережі незначно коливається відносно 50 Гц, і АЦП живляться від мережі, моменти початку й кінця інтегрування синхронізуються від мережі, і тому час інтегрування в точності дорівнює цілому числу періодів напруги мережі: $T_{\text{инт}} = t_2 - t_1 = n \cdot T$.

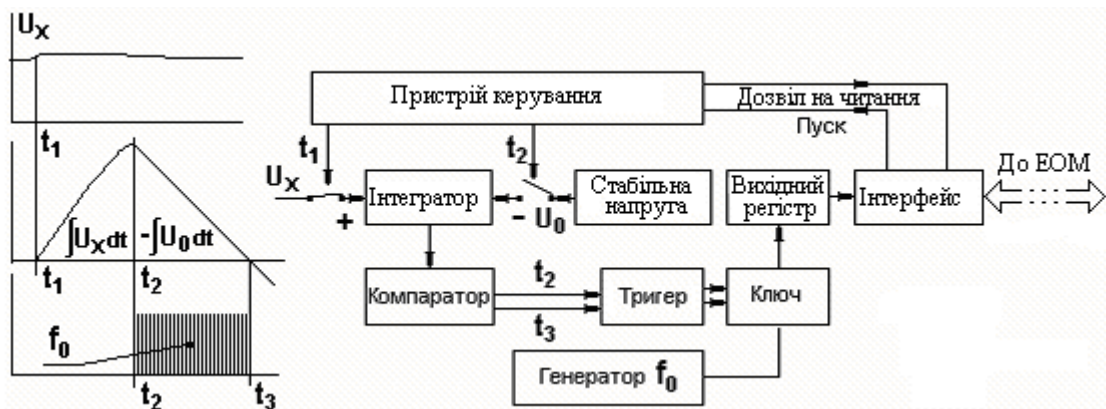


Рисунок 27 – Принцип дії інтегруючого АЦП.

У момент закінчення інтегрування t_2 вхідні кола інтегратора перемикаються так, щоб на його вхід замість вимірюваної напруги U_x надійшло стабілізовану напругу U_0 із протилежним знаком (що умовно показано на мал. 27). Починаючи із цього моменту, з напруги, отриманої в результаті інтегрування, починає відніматися лінійна напруга, що є продуктом інтегрування постійного стабілізованої напруги U_0 . Компаратор фіксує момент часу кінця інтегрування вхідної напруги t_2 й момент часу t_3 , коли сумарна напруга виявляється рівним нулю. У результаті інтервал часу $t_3 - t_2$ виявляється прямо пропорційним інтегралу від вхідної напруги, обчисленому за попередній інтервал часу. Якщо за цей час напруга U_x , вільна від перешкоди, не змінювалося, то цей інтеграл у свою чергу прямо пропорційний вимірюваній напрузі й дорівнює $n \cdot T \cdot U_x$. Тому інтервал часу $t_3 - t_2$ прямо пропорційний напрузі U_x , і в остаточному підсумку для завершення перетворення

залишається лише перевести цей інтервал часу в код, передбачивши множення на коефіцієнт пропорційності. Це робиться за рахунок підбора частоти f_0 , який заповнюється інтервал часу $t_3 - t_2$.

По закінченню описаних процедур пристрій керування формує сигнал, що дозволяє читання результату з вихідного регістра АЦП.

Із принципу дії інтегруючого АЦП треба, що мінімальний час перетворення не може бути менше 40 мс. Гранично досяжна погрішність подібних АЦП досягає 0.001% і краще.

Основна погрішність таких АЦП нормується межею допущеної відносної погрішності, вираженою двочленною формулою.

Основна область застосування інтегруючих АЦП - створення на їхній основі цифрових вимірювальних приладів підвищеної точності.

6.2.6 Метрологічні характеристики АЦП

Відповідно до ДСТ 8.009 метрологічними характеристиками АЦП є (див. також п. 3.8):

1. діапазон зміни вхідної напруги,
 2. вид вихідного коду й кількість розрядів,
 3. вхідний опір,
 4. ціна одиниці молодшого розряду вихідного коду,
 5. межа допущеної основної погрішності (як правило, відносною, нормованою двочленною формулою),
 6. межі допущеної додаткових погрішностей,
 7. тривалість циклу перетворення (або максимальна частота перетворень).
- У деяких випадках до цих характеристик додаються
8. інтегральна нелінійність (див. характеристику 8 п. 6.1),
 9. диференціальна нелінійність (див. характеристику 9 п. 6.1).

6.2.7 Зв'язок АЦП із комп'ютером

Зв'язок АЦП із комп'ютером здійснюється відповідно до протоколів обміну інформацією, що стандартизований для того або іншого інтерфейсу.

Найбільш популярними інтерфейсами, що забезпечують взаємний зв'язок між комп'ютером й автономним АЦП, є **RS 232 (COM - порт), RS 485, USB, IEEE 488, IEEE 1394**.

Для АЦП, які вбудовуються у комп'ютери, інтерфейсом є інтерфейс комп'ютера, а саме, інтерфейс **PCI** або інтерфейс портативних комп'ютерів (ноутбуків) **PCMCIA**.

Порівняльні характеристики інтерфейсів наведені нижче в таблиці 2.

Внутрішні інтерфейси комп'ютера мають характеристики:

- **PCI** - від 4 до 20 входів у промислових комп'ютерах, швидкість обміну 132 Мбайта/с,

- **PCMCIA** - до 3 входів у портативних комп'ютерах, швидкість обміну - до 1.0 Мбайта/с.

Таблиця 2 - Порівняльні характеристики інтерфейсів
для автономних АЦП

Тип інтерфейсу	RS 232	RS 485	USB
Швидкість обміну	30 біт/с -115Кбіт/с	До 10 Мбайт/с	До 12 Мбіт/с
Кількість пристроїв	1	31	127
Кількість проводів	9	9	4
Відстань	17 м	1200 м	5 м

6.3 Цифрові вимірювальні прилади

Цифрові вимірювальні прилади відрізняються від вимірювальних перетворювачів тим, що вихідні дані приладів повинні бути представлені людині - операторові в зручній для нього формі. Тому для побудови цифрових вимірювальних приладів використовуються АЦП, постачені засобами ручного керування й візуального подання результатів вимірів. Цифрові прилади деяких типів постачені пристроями інтерфейсного сполучення з комп'ютером, які передають у комп'ютер результати вимірювань, а також службову інформацію про позиції, у якій перебувають засоби ручного керування. Найчастіше для зв'язку приладів з комп'ютером застосовується приладовий інтерфейс IEEE 488.

Найпростіші варіанти без підключення перетворювачів на вході - це частотоміри й періодоміри, які створюються на базі відповідних АЦП, описаних вище в пп. 6.2.3, 6.2.4. Частотоміри й періодоміри звичайно сполучаються в одному корпусі.

На базі АЦП інших різновидів - порозрядного зрівноважування, розгортаючого перетворення, інтегруючих можуть бути створені вольтметри й амперметри постійного і змінного струму, а також омметри. Для цього до АЦП приєднуються вхідні перетворювачі. Звичайно в одному корпусі з АЦП містяться кілька перетворювачів, кожний з яких приєднується до АЦП за допомогою перемикача, керованого вручну або від комп'ютера. Подібні прилади називаються *мультиметрами*. Найбільш точні мультиметри, призначені для вимірювання постійної напруги, сили постійного струму й опору створюються на базі інтегруючих АЦП.

Останнім часом вольтметри й амперметри змінного струму створюються без випрямних перетворювачів. Принцип дії таких приладів полягає у виконанні вимірювань у два етапи.

На першому етапі виконуються дуже швидкі вимірювання миттєвих значень вхідної змінної напруги або сили струму. Частота вимірювань повинна перевищувати частоту першої гармоніки вимірюваного сигналу в кілька десятків разів. На другому етапі за результатами цих вимірювань виконуються обчислення необхідних характеристик, а саме, амплітудних, діючих або середньовипрямних значень. Результати таких вимірювань не будуть залежати від форми кривої напруги або токи, і при достатній швидкості вимірювань миттєвих значень час вимірювань не перевищить одного періоду вимірюваного сигналу.

Цифрові вимірювальні прилади інших фізичних величин створюються приєднанням на вхіді АЦП вимірювальних перетворювачів цих величин у напругу, силу струму, частоту, інтервал часу або в зміну опору. Природно, що цифровий індикатор і засоби ручного керування залишаються. Наявність інтерфейсного сполучення з комп'ютером не обов'язково.

Метрологічні характеристики цифрових вимірювальних приладів ті ж, що й метрологічні характеристики АЦП, перераховані в п. 6.2.6. за винятком характеристик інтегральної й диференціальної нелінійності.

6.4 Перешкоди й боротьба з ними

На якість роботи високочутливих електронних приладів, у тому числі цифрових, істотний вплив роблять *поперечні* перешкоди (перешкоди

нормального виду U_{nn}) і поздовжні перешкоди (перешкоди загального виду, синфазні перешкоди $U_{нд}$). Ці перешкоди показані на мал. 28, на якому через ВП і НП позначені високопотенційний і низькопотенційний затискачі приладу.

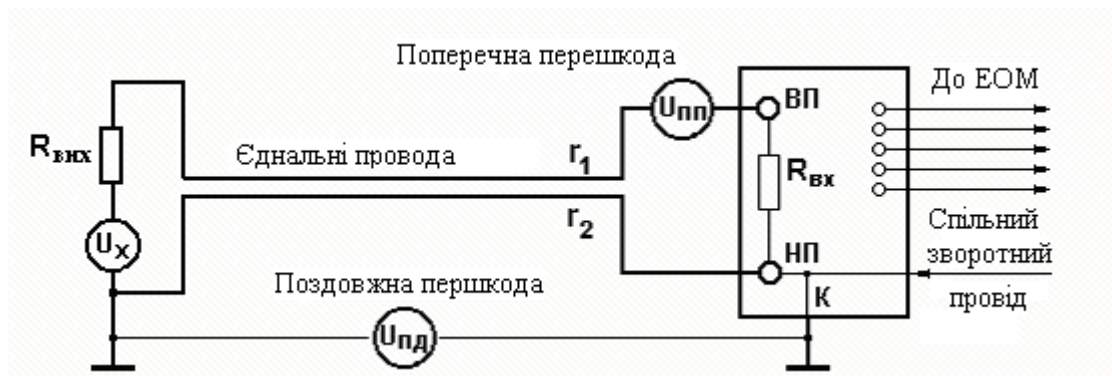


Рисунок 28 – Походження поздовжньої й поперечної перешкод.

Поперечні перешкоди суть перешкоди, які складаються із сигналом. Вони виникають внаслідок дії зовнішніх електромагнітних полів за рахунок взаємної індуктивності й паразитної ємності, які завжди мають місце.

Причинами виникнення поздовжніх перешкод є:

- високий опір контурів заземлення,
- далекість друг від друга точок заземлення корпусу датчика (або іншого вимірювального блоку) і корпусу приладу; це заземлення робиться, відповідно до вимог техніки безпеки,

- блукаючі струми в контурах заземлення й у середовищі, що знаходиться між точками заземлення.

До поздовжніх перешкод відносяться також перешкоди, які виникають у загальному проводі електронної схеми. Найчастіше такі перешкоди виникають в інтерфейсних сполученнях, коли для всіх проводів інтерфейсу всього один зворотний провід є загальним, як це показано на мал. 28.

В остаточному підсумку поздовжні перешкоди перетворюються в поперечну перешкоду за рахунок розходження опорів у контурі інформаційного кола: у верхній частині кола опір більше, ніж у нижній на суму вихідного опору джерела сигналу $R_{вых}$ й вхідного опору приймача $R_{вх}$.

Засобами боротьби з поперечними перешкодами є:

- скручування двох інформаційних проводів, за рахунок чого зменшується площа витка, що утворений цими проводами, такі проводи називаються *витою парою*,

- екранування вхідного кола, екран не має гальванічного зв'язку із вхідним колом і з корпусом,

- фільтрація сигналів, в окремому випадку - інтегрування,

- пропущення інформаційних проводів крізь один отвір у корпусі приладу.

Засоби боротьби з поздовжніми перешкодами:

- гальванічний поділ вхідних кіл приймача інформації від кола заземлення корпусу, завдяки чому практично розривається коло, через яку поздовжня перешкода попадає на вхід приладу (перетворювача),

- гальванічний поділ вихідних цифрових кіл за допомогою оптоелектронних пар, завдяки чому зворотні струми всіх ліній інтерфейсу, що циркулюють у єдиному загальному зворотному проводі, не створюють спадання напруги на загальному проводі електронної схеми приладу (перетворювача).

6.5 Запитання для самоконтролю.

1. Цифроаналогові перетворювачі
2. Аналого - цифрові перетворювачі
3. Цифрові вимірювальні прилади
4. Перешкоди й боротьба з ними

Список використаної літератури

1. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи.-Л.:Энергоатомиздат, 1983, 320 с.
2. Основы метрологии и электрические измерения/Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Душин Е.М. и др.; Под ред. Е.М.Душина.-Л.:Энергоатомиздат, 1987.
3. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений.-Л.:Энергоатомиздат, 1987, 320 с.
4. Х.Харт. Введение в измерительную технику. - М.: Мир, 1999, 391 с.
5. В.И.Нефедов, В.И.Хахин, Е.В.Федорова и др. Метрология и электро/радио измерения в телекоммуникационных системах.-М.:Высшая школа, 2001, 383 с.
6. Д.Ф.Тартаковский, А.С.Ястребов. Метрология, стандартизация и технические средства измерений.-М.: Высшая школа, 2001, 205 с.
7. Сергеев А.Г. и др. Метрология, учебное пособие для ВУЗов.-М.: Логос, 2000, 408 с.
8. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии.-М.: Юнити, 1999, 711 с.
9. Лифшиц И.М. Основы стандартизации, метрологии, сертификации.-М.: Юрайт, 2000, 285 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Конспект лекцій з дисципліни " Метрологія і електротехнічні вимірювання " для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форм навчання

Укладач: Юрій Юрійович Шрамко

Підписано до друку _____2017р.

Формат_____ Обсяг_____сторінок

Наклад_____ екз. Замовлення _____

51918, м.Кам'яєське ,
вул.Дніпробудівська,2