

**Міністерство освіти та науки України
Луцький національний технічний університет**



**МЕТРОЛОГІЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ
ВИМІРЮВАННЯ**

()
« » G ,
G3

Луцьк 2026

УДК 621.317.3 (076)
М54

До друку
Голова вченої ради
факультету архітектури,
будівництва та _____ О.В. Андрійчук

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ
Директор бібліотеки _____ . . .

Затверджено вченою радою факультету архітектури, будівництва та
ЛНТУ, протокол № _____ від «____» _____ 2026 року.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електричної інженерії ЛНТУ, протокол
№ _____ від «_____» 2026 року.

Завідувач кафедри електричної інженерії _____ Ю.В. Грицюк

Укладачі: _____ Д. С. Собчук, к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії
ЛНТУ.

_____ , к. н., _____ кафедри електричної
інженерії ЛНТУ.
Рецензент: _____ М.В. Романюк, кандидат технічних наук, доцент.

Відповідальний за випуск: _____ Ю.В. Грицюк, кандидат технічних наук,
доцент, завідувач кафедри електричної інженерії ЛНТУ.

[_____]:
(_____)
« _____ , _____ , _____ /
М54 _____ » _____
G3 _____ , _____ /
_____ , _____ : _____ , 2026. 60

В методичних вказівках зібраний, систематизований та наочно викладений
теоретичний і методичний матеріал, який охоплює практичні питання методології
електричних вимірювань та опрацювання отриманих результатів експериментів.
Структура кожної лабораторної роботи, їх зміст є методично-обґрунтованими та
роблять методичні вказівки зручними для самостійного опрацювання матеріалу
студентами.

Д. С. Собчук, . . . 2026

Метрологія та електричні вимірювання [Текст]:

(_____)
« _____ , _____ , _____ »
G3 _____ , _____ / уклад. Д. С. Собчук,
_____ , Луцьк : ВІП ЛНТУ, 2026. 60 с

Комп'ютерний набір та верстка: _____ Д. С. Собчук

Підп. до друку _____ 2026 р.
Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Таймс.
Ум. друк. арк. 4,85. Обл.-вид. арк. 4,4.
Тираж 50 прим.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ВІП Луцького НТУ

ЛІТЕРАТУРА

1. Поліщук Є.С. Дорожовець М.М., Яцук В.О., Ванько В.М., Бойко Т.Г. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник; за ред. проф. Є.С.Поліщука. Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2019. 544 с
2. Нестерчук Д.М., Постнікова М.В. Практикум з дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології»: навчальне видання. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 100 с.
3. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: конспект лекцій / Д.М. Нестерчук. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. – 256 с.
4. Науково-виробничий журнал Міністерства палива та енергетики «Енергетика та електрифікація»
5. Науково-виробничий журнал «Метрологія та прилади» <https://mmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/20>
6. Науковий журнал «Вимірювальна техніка та метрологія» <http://science.lpnu.ua/uk/istcmtm/vsi-vypusky>

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. Метрологічна оцінка результатів однократних вимірювань.....	5
2. Метрологічна оцінка результатів багатократних вимірювань.....	14
3. Розширення меж вимірювання електровимірювальних приладів.....	21
4. Вимірювання параметрів змінної напруги за допомогою аналогових вольтметрів.....	27
5. Вимірювання опору.....	33
6. Вимірювання потужності в колах змінного струму	39
7. Вимірювання параметрів періодичних сигналів за допомогою електронно-променевого осцилографа	46
ДОДАТКИ	53
ЛІТЕРАТУРА	58

ВСТУП

Загальний рівень розвитку науки та техніки, технічний прогрес у всіх галузях народного господарства завжди визначався і визначатиметься рівнем розвитку вимірювальної техніки, тому при підготовці фахівців високої кваліфікації технічних спеціальностей важливу роль відіграє опанування такої дисципліни як «Метрологія та електричні вимірювання». Запропонований збірник містить основні задачі, опрацювання яких необхідне для успішного засвоєння курсу. здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та для викладачів при підготовці до практичних робіт.

. Програма курсу тематично пов'язана з дисциплінами загального напрямку підготовки бакалаврів, а саме – фізика, електротехніка,.

Для формування навичок розв'язання задач наводиться короткий виклад теоретичного матеріалу та методика розв'язання типових задач. Після опрацювання даного матеріалу студент може переходити до вирішення самостійних завдань, дотримуючись поданої методики розв'язання і правил оформлення роботи. Структура збірника дозволить успішно використовувати його як на практичних заняттях, так і для самостійної роботи студентів. В посібнику наводиться довідковий матеріал, що містить відомості про параметри і характеристики лабораторних електровимірювальних приладів.

Матеріал згруповано по темах, що відповідають робочій програмі дисципліни. Для успішного закріплення матеріалу по кожній темі наведені питання для самоконтролю.

Запропонований підхід до освоєння матеріалу дозволить майбутньому фахівцеві набути навичок вибору методів та приладів для вимірювання різноманітних фізичних величин, планування та організації вимірювального експерименту, опрацювання результатів та визначення похибок вимірювання.

1	2	3	4	5	6	7	8
Д5020/1	Ел.дин.	0,5	300	10	0,1	5,0	0,005
Д5020/1	Ел.дин.	0,5	450	10	0,1	5,0	0,005
Д5020/1	Ел.дин.	0,5	600	10	0,1	5,0	0,005
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	30	5	0,1	5,0	0,016
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	75	5	0,1	5,0	0,016
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	150	5	0,1	5,0	0,016
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	300	5	0,1	5,0	0,016
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	450	5	0,1	5,0	0,016
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	600	5	0,1	5,0	0,016
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	30	2,5	0,1	5,0	0,04
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	75	2,5	0,1	5,0	0,04
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	150	2,5	0,1	5,0	0,04
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	300	2,5	0,1	5,0	0,04
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	450	2,5	0,1	5,0	0,04
Д5020/2	Ел.дин.	0,5	600	2,5	0,1	5,0	0,04
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	30	1	0,1	5,0	0,16
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	75	1	0,1	5,0	0,16
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	150	1	0,1	5,0	0,16
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	300	1	0,1	5,0	0,16
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	450	1	0,1	5,0	0,16
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	600	1	0,1	5,0	0,16
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	30	0,5	0,1	5,0	0,65
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	75	0,5	0,1	5,0	0,65
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	150	0,5	0,1	5,0	0,65
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	300	0,5	0,1	5,0	0,65
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	450	0,5	0,1	5,0	0,65
Д5020/3	Ел.дин.	0,5	600	0,5	0,1	5,0	0,65
Д5020/4	Ел.дин.	0,5	30	0,25	0,1	5,0	2,6
Д5020/4	Ел.дин.	0,5	75	0,25	0,1	5,0	2,6
Д5020/4	Ел.дин.	0,5	150	0,25	0,1	5,0	2,6

Лабораторна робота №1
МЕТРОЛОГІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ОДНОКРАТНИХ
ВИМІРЮВАНЬ

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При вимірюванні фізичних величин за допомогою навіть найточніших засобів і методів результат завжди відрізняється від істинного значення вимірюваної величини, тобто визначається з деякою похибкою. *Похибка результату вимірювання* – це різниця між показами засобу вимірювання і дійсним (істинним) значенням вимірюваної фізичної величини. Поняття «похибка» є одним з центральних в метрології, вона характеризує точність результатів вимірювання, що проводяться даним засобом вимірювальної техніки.

Класифікація похибок.

Існує шість основних ознак, по яких класифікують похибки вимірювання.

1) За способом кількісного вираження похибки діляться на:

- *Абсолютні похибки Δ* - це відхилення результату вимірювання X від дійсного значення фізичної величини X_d , виражається в одиницях вимірюваної величини:

$$\Delta = X - X_d . \quad (1)$$

Абсолютна похибка характеризує величину і знак отриманої похибки, але не визначає якість самого проведеного вимірювання. Характеристикою якості є поняття точності вимірювань, що відображає міру близькості результатів вимірювань до дійсного значення вимірюваної величини. Точність і похибка зв'язані зворотню залежністю. Інакше кажучи, високій точності вимірювань відповідає мала похибка. Тому, аби мати можливість порівнювати якість вимірювань, введено поняття відносної похибки.

- *Відносні похибки δ* - це відношення абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини. Оскільки $\Delta \ll X_d$, то відносна похибка може бути визначена і через виміряне значення величини X :

$$\delta = \frac{\Delta}{X_d} \cdot 100\% , \text{ або } \delta = \frac{\Delta}{X} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Мірою точності є величина, зворотна модулю відносної похибки, тобто $1/|\delta|$.

Із співвідношення (2) видно, що значення відносної похибки δ зменшується із зростанням величини X_d . Тому для вимірювань доцільно вибирати такий прилад, покази якого були б в кінцевій частині його шкали (діапазону вимірювань), а для порівняння різних приладів використовувати поняття зведеної похибки.

- *Зведені похибки γ* – це відношення абсолютної похибки вимірювання Δ до деякого нормуючого значення X_N (наприклад, до кінцевого значення шкали приладу – діапазону вимірювання):

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\% . \quad (3)$$

1	2	3	4	5	6	7	8
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	600	10	1,0	3,0	0,003
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	30	5	1,0	3,0	0,005
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	75	5	1,0	3,0	0,005
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	150	5	1,0	3,0	0,005
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	300	5	1,0	3,0	0,005
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	450	5	1,0	3,0	0,005
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	600	5	1,0	3,0	0,005
Д5004/2	Ф.дин.	0,5	30	2,5	1,0	3,0	0,008
Д5004/2	Ф.дин.	0,5	75	2,5	1,0	3,0	0,008
Д5004/2	Ф.дин.	0,5	150	2,5	1,0	3,0	0,008
Д5004/2	Ф.дин.	0,5	300	2,5	1,0	3,0	0,008
Д5004/2	Ф.дин.	0,5	450	2,5	1,0	3,0	0,008
Д5004/2	Ф.дин.	0,5	600	2,5	1,0	3,0	0,008
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	30	2	1,0	3,0	0,0125
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	75	2	1,0	3,0	0,0125
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	150	2	1,0	3,0	0,0125
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	300	2	1,0	3,0	0,0125
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	450	2	1,0	3,0	0,0125
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	600	2	1,0	3,0	0,0125
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	30	1	1,0	3,0	0,025
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	75	1	1,0	3,0	0,025
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	150	1	1,0	3,0	0,025
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	300	1	1,0	3,0	0,025
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	450	1	1,0	3,0	0,025
Д5004/3	Ф.дин.	0,5	600	1	1,0	3,0	0,025
Д5004/4	Ф.дин.	0,5	30	0,5	1,0	3,0	0,068
Д5004/4	Ф.дин.	0,5	75	0,5	1,0	3,0	0,068
Д5004/4	Ф.дин.	0,5	150	0,5	1,0	3,0	0,068
Д5004/4	Ф.дин.	0,5	300	0,5	1,0	3,0	0,068
Д5004/4	Ф.дин.	0,5	450	0,5	1,0	3,0	0,068
Д5004/4	Ф.дин.	0,5	600	0,5	1,0	3,0	0,068
Д5004/5	Ф.дин.	0,5	30	0,25	1,0	3,0	0,24
Д5004/5	Ф.дин.	0,5	75	0,25	1,0	3,0	0,24
Д5004/5	Ф.дин.	0,5	150	0,25	1,0	3,0	0,24
Д5004/5	Ф.дин.	0,5	300	0,25	1,0	3,0	0,24
Д5004/5	Ф.дин.	0,5	450	0,25	1,0	3,0	0,24
Д5004/5	Ф.дин.	0,5	600	0,25	1,0	3,0	0,24
Д5004/6	Ф.дин.	0,5	30	0,1	1,0	3,0	1,4
Д5004/6	Ф.дин.	0,5	75	0,1	1,0	3,0	1,4
Д5004/6	Ф.дин.	0,5	150	0,1	1,0	3,0	1,4
Д5004/6	Ф.дин.	0,5	300	0,1	1,0	3,0	1,4
Д5004/6	Ф.дин.	0,5	450	0,1	1,0	3,0	1,4
Д5004/6	Ф.дин.	0,5	600	0,1	1,0	3,0	1,4
Д5020/1	Ел.дин.	0,5	30	10	0,1	5,0	0,005
Д5020/1	Ел.дин.	0,5	75	10	0,1	5,0	0,005
Д5020/1	Ел.дин.	0,5	150	10	0,1	5,0	0,005

В загальному випадку $X_N = X_{\max} - X_{\min}$, де X_{\max} і X_{\min} - максимальне і мінімальне значення діапазону вимірювання приладу.

2) По характеру зміни похибки вимірювань поділяються на:

- *Систематичні похибки* Δ_c – складові похибки вимірювання, що залишаються постійними або закономірно змінюються при багатократних (повторних) вимірюваннях однієї і тієї ж величини в одних і тих же умовах. Такі похибки можуть бути виявлені шляхом детального аналізу можливих їх джерел і зменшені (застосуванням точніших приладів, калібруванням приладів, введенням поправок тощо), проте повністю їх усунути не можна.

- *Випадкові похибки* Δ_s – складові похибки вимірювання, що змінюються випадковим чином при повторних (багатократних) вимірюваннях однієї і тієї ж величини в одних і тих же умовах. Їх оцінюють засобами математичної статистики.

- *Грубі похибки (промахи)* – похибки, що істотно перевищують очікувані результати. Такі похибки виникають через помилки оператора або невраховані зовнішні впливи. Їх виявляють при обробці результатів вимірювань і виключають з розгляду, користуючись певними правилами.

3) По причинах виникнення похибки вимірювання поділяються на:

- *Методичні похибки* виникають через недосконалість методу вимірювань, використання невірних теоретичних передумов (допущень) при вимірюваннях, а також через вплив вибраного засобу вимірювання на вимірювані величини.

Наприклад при підключенні електровимірювального приладу ним від джерела сигналу буде споживатись деяка потужність. Це приводить до спотворення режиму роботи вимірювального кола і викликає появу методичної похибки. Так, наприклад, якщо вольтметр має недостатньо високий вхідний опір, то його підключення до схеми здатне змінити в ній розподіл струмів і напруг. При цьому результат вимірювання може істотно відрізнятись від дійсного.

- *Інструментальні (апаратні, приладові) похибки* виникають через недосконалість засобів вимірювання. Джерелами інструментальних похибок можуть бути, наприклад, неточне градування приладу і зсув нуля, варіація показів приладу в процесі експлуатації і так далі. Зменшують інструментальні похибки застосуванням точнішого приладу.

- *Зовнішні похибки* – важлива складова похибки вимірювання, пов'язана з відхиленням однієї або декількох впливаючих величин від нормальних значень або виходом їх за межі нормальної області (наприклад, вплив вологості, температури, зовнішніх електричних і магнітних полів, нестабільності джерел живлення, механічних дій і так далі). В більшості випадків зовнішні похибки є систематичними і визначаються додатковими похибками застосовуваних засобів вимірювань.

- *Суб'єктивні похибки* викликаються помилками оператора при відліку показів засобів вимірювання (похибки від недбалості оператора, від паралаксу, тобто від неправильного напрямку погляду при відліку показів стрілочного приладу і ін.). Подібні похибки усуваються застосуванням сучасних цифрових приладів або автоматичних методів вимірювання.

4) По характеру поведінки фізичної величини в процесі вимірювань розрізняють статичні і динамічні похибки.

1	2	3	4	5
M25/7	$0,5 \cdot 10^{-9}$	2500	20000	10
M25/11	$4,5 \cdot 10^{-9}$	35	70	15
M25/12	$1,3 \cdot 10^{-9}$	400	1400	15
M25/13	$0,4 \cdot 10^{-9}$	3500	15000	15
M17/6	$4,0 \cdot 10^{-9}$	180	500	5
M17/7	$3,0 \cdot 10^{-9}$	500	1300	5

Додаток 4.

Основні технічні дані ватметрів електро- та феродинамічної систем

Тип	Система	Клас точн.	U_{HW} , В	I_{HW} , А	$\cos \varphi_w$	I_{UW} , мА	R_{IW} , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8
Д580/1	Ел. ин.	0,2	75	10	1,0	5	0,0104
Д580/1	Ел. ин.	0,2	150	10	1,0	5	0,0104
Д580/1	Ел. ин.	0,2	300	10	1,0	5	0,0104
Д580/1	Ел. ин.	0,2	600	10	1,0	5	0,0104
Д580/2	Ел. ин.	0,2	75	5	1,0	5	0,011
Д580/2	Ел. ин.	0,2	150	5	1,0	5	0,011
Д580/2	Ел. ин.	0,2	300	5	1,0	5	0,011
Д580/2	Ел. ин.	0,2	600	5	1,0	5	0,011
Д580/2	Ел. ин.	0,2	75	2,5	1,0	5	0,025
Д580/2	Ел. ин.	0,2	150	2,5	1,0	5	0,025
Д580/2	Ел. ин.	0,2	300	2,5	1,0	5	0,025
Д580/2	Ел. ин.	0,2	600	2,5	1,0	5	0,025
Д580/3	Ел. ин.	0,2	75	1,0	1,0	5,0	0,081
Д580/3	Ел. ин.	0,2	150	1,0	1,0	5,0	0,081
Д580/3	Ел. ин.	0,2	300	1,0	1,0	5,0	0,081
Д580/3	Ел. ин.	0,2	600	1,0	1,0	5,0	0,081
Д580/3	Ел. ин.	0,2	75	0,5	1,0	5,0	0,105
Д580/3	Ел. ин.	0,2	150	0,5	1,0	5,0	0,105
Д580/3	Ел. ин.	0,2	300	0,5	1,0	5,0	0,105
Д580/3	Ел. ин.	0,2	600	0,5	1,0	5,0	0,105
Д580/4	Ел. ин.	0,2	75	0,25	1,0	5,0	0,46
Д580/4	Ел. ин.	0,2	150	0,25	1,0	5,0	0,46
Д580/4	Ел. ин.	0,2	300	0,25	1,0	5,0	0,46
Д580/4	Ел. ин.	0,2	600	0,25	1,0	5,0	0,46
Д580/5	Ел. ин.	0,2	75	0,1	1,0	5,0	3,13
Д580/5	Ел. ин.	0,2	150	0,1	1,0	5,0	3,13
Д580/5	Ел. ин.	0,2	300	0,1	1,0	5,0	3,13
Д580/5	Ел. ин.	0,2	600	0,1	1,0	5,0	3,13
Д566/15	Ел. ин.	0,2	450	5	1,0	30	0,013
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	75	10	1,0	3,0	0,003
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	150	10	1,0	3,0	0,003
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	300	10	1,0	3,0	0,003
Д5004/1	Ф.дин.	0,5	450	10	1,0	3,0	0,003

Додаток 2.

Основні технічні дані амперметрів та вольтметрів електромагнітної системи

Амперметри				Вольтметри			
Тип	Кл. точн. γ_A	Межа вимір. I_{HA}, A	Номін. опір, $R_A, \text{Ом}$	Тип	Кл. точн. γ_V	Межа вимір. U_{HV}, B	Номін. опір $R_V, \text{Ом}$
Э513/1	0,5	0,01	320	Э515/1	0,5	1,5	7,5
Э513/1	0,5	0,02	145	Э515/1	0,5	3	15
Э513/1	0,5	0,04	34	Э515/1	0,5	7,5	37,5
Э513/2	0,5	0,025	50	Э515/1	0,5	15	75
Э513/2	0,5	0,05	12,5	Э515/2	0,5	7,5	100
Э513/2	0,5	0,1	3,1	Э515/2	0,5	15	200
Э513/3	0,5	0,2	0,7	Э515/2	0,5	30	1200
Э513/4	0,5	0,25	0,45	Э515/2	0,5	60	2400
Э513/4	0,5	0,5	0,12	Э515/3	0,5	75	10000
Э514/1	0,5	1	0,035	Э515/3	0,5	150	20000
Э514/1	0,5	2	0,012	Э515/3	0,5	300	40000
Э514/2	0,5	2,5	0,01	Э515/3	0,5	600	80000
Э514/2	0,5	5	0,005	Э515/4	1,0	50	1667
Э514/3	0,5	10	0,004	Э515/4	1,0	100	3333

Додаток 3.

Основні технічні дані магнітоелектричних гальванометрів

Тип	Стала за струмом $C_I, A/\text{под.}$	Внутрішній опір $R_G, \text{Ом}$	Критичний опір $R_K, \text{Ом}$	Період вільних коливань T_O, c
1	2	3	4	5
M118	$1,8 \cdot 10^{-7}$	350	350	5
M273/1	$5,1 \cdot 10^{-8}$	5500	30000	3,2
M273/2	$1,0 \cdot 10^{-7}$	650	6000	3,2
M273/3	$5,0 \cdot 10^{-7}$	45	300	3,2
M273/6	$3,0 \cdot 10^{-7}$	1320	1500	2,0
M273/7	$1,0 \cdot 10^{-6}$	150	150	2,0
M273/9	$4,0 \cdot 10^{-7}$	250	2000	2,3
M197/1	$0,8 \cdot 10^{-8}$	600	1000	10
M197/2	$8,0 \cdot 10^{-8}$	9	10	10
M1177/1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	70	300	3
M1177/2	$4,6 \cdot 10^{-9}$	150	3000	3
M1177/3	$1,8 \cdot 10^{-9}$	1700	15000	3
M196/1	$0,5 \cdot 10^{-8}$	2000	5000	3
M25/3	$1,2 \cdot 10^{-8}$	16	50	10
M25/4	$3,0 \cdot 10^{-9}$	100	700	10
M25/5	$1,5 \cdot 10^{-9}$	350	2500	10
M25/6	$1,0 \cdot 10^{-9}$	700	6000	10

- *Статичні похибки* виникають при вимірюванні сталого значення фізичної величини, тобто коли ця величина перестає змінюватися в часі.

- *Динамічні похибки* мають місце коли вимірювана величина змінюється в часі і потрібно встановити закон її зміни. Причина появи динамічних похибок полягає в невідповідності швидкісних (часових) характеристик приладу і швидкості зміни вимірюваної величини.

5) За умовами, в яких використовуються засоби вимірювання, розрізняють основну і додаткову похибки.

Нормальним умови застосування засобів вимірювань є ряд основних вимог: температура довколишнього повітря (20±5) °С; відносна вологість (65±15) %; атмосферний тиск (100±4) кПа; напруга мережі живлення (220±4) В і (115±2,5) В; частота мережі (50±1) Гц і (400±12) Гц.

- *Основна похибка вимірювального приладу* має місце за нормальних умов експлуатації засобу вимірювання, обумовлених в регламентуючих документах (паспорті, технічних умовах і ін.).

- *Додаткова похибка вимірювань* виникає при відхиленні умов експлуатації ЗВ від нормальних (номінальних). Дана похибка, як і основна, вказується в нормативних документах.

б) В залежності від зв'язку з вимірюваною величиною X похибка приладу може бути представлена у вигляді:

- *адитивної похибки* – числом, що є постійним для всього діапазону вимірювання (для будь-яких значень X):

$$\Delta = \pm a, \quad (4)$$

- *мультиплікативної похибки* - залежить від чутливості приладу і змінюється пропорційно до поточного значення вимірюваної величини X:

$$\Delta = \pm b \cdot X, \quad (5)$$

- *в двочленному виді*, що включає адитивну і мультиплікативну складові:

$$\Delta = \pm(a + b \cdot X), \quad (6)$$

- *в вигляді рівняння*:

$$\Delta = f(X). \quad (7)$$

При складній функціональній залежності допускається представлення похибки в вигляді графіка чи таблиці.

Необхідно відзначити, що проведена вище класифікація похибок вимірювань є умовною (відносною).

Оцінка похибки прямих однократних вимірювань.

1) Основна інструментальна похибка (похибка приладу).

При прямих однократних вимірюваннях (прямими називаються вимірювання, при яких шукане значення величини знаходять безпосередньо з дослідних даних) оцінку похибки приладу проводять на основі *класу точності приладу K*, що нормується у всьому діапазоні вимірювань і вибирається з чисел (1; 1.5; 2; 2.5; 3; 4; 5; 6)*10ⁿ, де n=1, 0, -1, -2, -3, ...

Існують наступні види позначення класу точності приладів:

1. Клас точності вказують одним з чисел приведенного ряду p , яке відповідає зведеній похибці γ . Використовується для приладів з рівномірною шкалою, в яких границя зведеної похибки стала (присутня тільки адитивна складова похибки (4)). Використовується для позначення похибки вольтметрів, амперметрів, ватметрів тощо. Тоді зведена, абсолютна і відносна похибки дорівнюють:

$$\pm\gamma = p, \%; \quad \pm\Delta = \gamma \cdot X_N / 100; \quad \pm\delta = \gamma \cdot \frac{X_N}{X}, \%. \quad (8)$$

2. Клас точності вказується з чисел ряду у вигляді p . Використовується для засобів вимірювань з нерівномірною шкалою, наприклад омметрів. Тоді, крім значення вимірюваної величини X , необхідно записати відлік приладу X' і нормоване значення (діапазон вимірювання) X'_N в одиницях довжини шкали приладу (мм, см, поділок):

$$\pm\gamma = p, \%; \quad \pm\delta = \gamma \cdot \frac{X'_N}{X'}, \%; \quad \pm\Delta = \delta \cdot X / 100. \quad (9)$$

3. Клас точності вказується з ряду чисел у вигляді q .

Для приладів, в яких границя відносної похибки стала на всьому діапазоні вимірювань (існує тільки мультиплікативна похибка). При цьому вказуються границі робочого діапазону даного класу точності. Використовується для вимірювальних мостів, магазинів, масштабних перетворювачів. Тоді:

$$\pm\gamma = q \cdot \frac{X}{X_N}, \%; \quad \pm\delta = q, \%; \quad \pm\Delta = q \cdot X / 100. \quad (10)$$

4. Клас точності записується двома числами c/d , наприклад 0,02/0,01. Застосовують для засобів, похибка яких нормується за формулою (6). Використовується для цифрових вольтметрів, потенціометрів постійного струму та ін. високоточних приладів.

$$\pm\gamma = c, \%; \quad \pm\delta = \left[c + d \cdot \left(\left| \frac{X_N}{X} \right| - 1 \right) \right], \%; \quad \pm\Delta = \delta \cdot X / 100. \quad (11)$$

де X_N – границя вимірювань;

$c = b + a/X_N$ - зведена похибка в кінці діапазону вимірювань ($X = X_N$);

$d = a/X_N$ - зведена похибка на початку діапазону ($X=0$), причому $c > d$.

2) Основна методична похибка.

Абсолютну і відносну методичні похибки вимірювання обраховують за означенням (формули (1) і (2)) з врахуванням внутрішнього опору приладу і схеми його вмикання в вимірювальне коло.

Якщо, наприклад, для вимірювання струму в деяке коло включити амперметр, причому вихідний опір кола по відношенню до затискачів амперметра рівний R , а напруга холостого ходу по відношенню до тих же затискачів U , то дійсне значення струму в ланцюзі запишеться як $I_d = U / R$, а виміряне дорівнює $I = U / (R + R_A)$.

ДОДАТКИ

Додаток 1.

Основні технічні дані амперметрів та вольтметрів магнітоелектричної системи

Міліамперметри				Мілівольтметри			
Тип	Кл. точн. γ_A	Межа вимір. I_{HA} , мА	Спад напр. U_A , В	Тип	Кл. точн. γ_V	Межа вимір. U_{HV} , мВ	Струм повн. відх. I_V , мА
M1104	0,2	0,75	27	M1106	0,2	45	1,0
M1104	0,2	1,5	55	M1106	0,2	75	1,0
M1104	0,2	3	68	M1106	0,2	150	1,0
M1104	0,2	7,5	80	M1106	0,2	300	1,0
M1104	0,2	15	80	M1106	0,2	750	1,0
M1104	0,2	30	80	M2007	0,2	15	0,25
M1104	0,2	75	80	M2007	0,2	60	0,5
M1104	0,2	150	80	M1109	0,2	15	0,5
M1109	0,2	60	75	M109	0,5	45	3,0
M109	0,5	50	270	M253	0,5	15	0,75
M109	0,5	200	270	M253	0,5	30	1,5
M253	0,5	0,75	16	M253	0,5	60	3,0
M253	0,5	1,5	32	M253	0,5	75	0,75
M253	0,5	3	64	M253	0,5	150	1,5
M253	0,5	7,5	27	M253	0,5	300	3,0
M253	0,5	15	54	M123	0,5	75	1,0
M253	0,5	30	108	M123	0,5	150	1,0
M253	0,5	75	27	M1172	0,5	100	1,0
M253	0,5	150	54	M1172	0,5	300	1,0
M1104	0,2	0,3	87	M1106	0,2	1,5	1,0
M1104	0,2	0,75	87	M1106	0,2	3	1,0
M1104	0,2	1,5	100	M1106	0,2	7,5	1,0
M1104	0,2	3	100	M1106	0,2	15	1,0
M1104	0,2	7,5	140	M1106	0,2	30	1,0
M1104	0,2	15	160	M1106	0,2	75	1,0
M1104	0,2	30	230	M1106	0,2	150	1,0
M109	0,5	1	55	M253	0,5	0,75	0,75
M109	0,5	2	55	M253	0,5	1,5	1,5
M109	0,5	5	65	M253	0,5	3	3,0
M109	0,5	10	65	M253	0,5	7,5	0,75
M253	0,5	0,3	108	M253	0,5	15	1,5
M253	0,5	0,75	39	M253	0,5	30	3,0
M253	0,5	1,5	78	M253	0,5	75	0,75
M253	0,5	3	156	M253	0,5	150	1,5
M253	0,5	7,5	63	M253	0,5	300	3,0
M253	0,5	15	125	M109	0,5	5	0,01

6. Зобразити осцилограму, що буде відображена на екрані осцилографа, якщо безпосередньо на пластини X і Y подаються сигнали: $u_x(t) = 2 \sin \omega t$ і $u_y(t) = 3 \sin 2\omega t$. Вважаємо, що чутливість ЕПТ по вертикалі і горизонталі однакова.

7. На вхід каналу Y осцилографа подано гармонійний сигнал з частотою 150 кГц. Частота генератора лінійної періодичної розгортки 30 кГц, час зворотнього ходу променя приймаємо рівним нулю. Як виглядатиме зображення на екрані?

8. На екрані осцилографа отримали зображення рис. 7.5,б. Визначити частоту вимірюваного сигналу, якщо частота гармонійного сигналу зразкового генератора, підключеного до входу X рівна 100кГц.

9. При вимірюванні фазового зсуву підсилувача за допомогою двоканального осцилографа методом лінійної розгортки, отримали тривалість періоду синусоїдного сигналу на екрані осцилографа – 8 поділок; а час, що відповідає фазовому зсуву – 2 поділки. Абсолютна похибка вимірювання лінійних розмірів – 0,1 под. Визначити фазовий зсув (в градусах), оцінити абсолютну і відносну похибки вимірювання.

10. При вимірюванні фазового зсуву гармонійного сигналу з частотою 10кГц за допомогою двопробеневого осцилографа при лінійній розгортці отриманий відлік лінійного розміру фазового зсуву – 20 мм. Визначити фазовий зсув (в градусах), якщо коефіцієнт розгортки рівний 20 мкс/см.

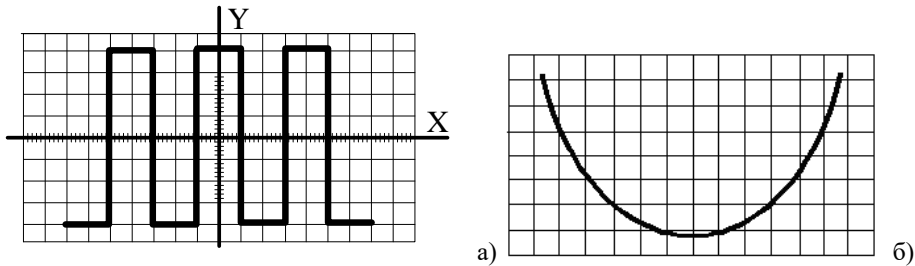


Рис.7.5. Осцилограми до задач 1 і 8.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Будова електронно-променевого осцилографа.
2. Як утворюється зображення на екрані осцилографа.
3. Опишіть роботу осцилографа в режимі лінійної розгортки.
4. Як отримати зображення фігур Ліссажу на екрані осцилографа?
5. Від чого залежить форма фігури Ліссажу?
6. Від чого залежить масштаб зображення на екрані осцилографа?
7. Як здійснюється вимірювання амплітуди сигналів?
8. Як здійснюється вимірювання інтервалів часу?
9. Які є способи вимірювання частоти за допомогою осцилографа?
10. Як здійснюється вимірювання фази і зсуву фаз?

Тоді абсолютна методична похибка дорівнює різниці вимірюваного значення струму і дійсного:

$$\Delta_{IM} = I - I_D = -UR_A / R(R + R_A). \quad (12)$$

Відносна методична похибка при цьому рівна:

$$\delta_{IM} = (I - I_D) / I_D = -R_A / (R + R_A). \quad (13)$$

Аналогічно при вимірюванні напруги на затискачах активного двополюсника з вихідним опором R і напругою холостого ходу U вольтметром з внутрішнім опором R_V можна отримати:

$$\Delta_{UM} = U - U_D = I \frac{R_V \cdot R}{R_V + R} - IR, \quad \delta_{UM} = \frac{U - U_D}{U_D} = \frac{R_V}{R_V + R} - 1 = \frac{-R}{R_V + R}. \quad (14)$$

З виразів (13) і (14) видно, що для зменшення методичної похибки при виборі вимірювальних приладів необхідно дотримуватися умов $R_A \ll R$ і $R_V \gg R$.

Оцінка похибки непрямих однократних вимірювань.

При *непрямих (опосередкованих) вимірюваннях* шукане значення величини знаходять на основі відомої залежності між цією величиною і величинами, що безпосередньо вимірюються, кожна з яких має свою абсолютну похибку $A = f(x, y, z, \dots)$ (наприклад, визначення опору за допомогою вольтметра і амперметра за законом Ома). Тоді *систематична похибка функції* обраховується як максимально можливе значення комбінації похибок безпосередньо вимірюваних величин:

$$\delta A = \pm \left[\left| \frac{\partial f}{\partial x} \delta x \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \delta y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \delta z \right| + \dots \right], \quad (15)$$

де $\frac{\partial f}{\partial x}$, $\frac{\partial f}{\partial y}$, $\frac{\partial f}{\partial z}$ - часткові похідні функції $A = f(x, y, z, \dots)$ по аргументу x, y, z, \dots ;

$\delta x, \delta y, \delta z$ - систематичні похибки аргументів.

Формули розрахунку похибок опосередкованих вимірювань для найпоширеніших функцій приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Функціональна залежність	Абсолютна похибка	Відносна похибка
$A = A_1 \pm A_2$	$\Delta A_1 + \Delta A_2$	$\frac{\Delta A_1 + \Delta A_2}{A_1 \pm A_2}$
$A = A_1 \cdot A_2$	$A_2 \cdot \Delta A_1 + A_1 \cdot \Delta A_2$	$\frac{\Delta A_1}{A_1} + \frac{\Delta A_2}{A_2} = \delta A_1 + \delta A_2$
$A = \frac{A_1}{A_2}$	$\frac{\Delta A_1}{A_2} + \frac{A_1 \cdot \Delta A_2}{A_2^2}$	$\frac{\Delta A_1}{A_1} + \frac{\Delta A_2}{A_2} = \delta A_1 + \delta A_2$
$A = \ln A_1$	$\frac{\Delta A_1}{A_1}$	$\frac{1}{ \ln A_1 } \cdot \frac{\Delta A_1}{A_1}$

Для того, щоб оцінити похибку, яка входить в кінцевий результат вимірювання, користуються *граничними значеннями похибки* Δ_{ep} - це максимальне сумарне значення похибки вимірювання. При цьому систематичні похибки Δ_i додаються з врахуванням їх знаків, сумарна похибка Δ_{ep} є модулем отриманої суми:

$$\Delta_{ep} = \left| \sum_{i=1}^m \Delta_i \right|. \quad (16)$$

Тоді **інтервал дійсного значення вимірюваної величини** в будь-якому випадку записується у вигляді:

$$X_{д} = X_{в} \pm \Delta_{ep}. \quad (17)$$

Поправкою називається абсолютна похибка, взята з протилежним знаком $\sigma = -\Delta_{ep}$, поправка вводить в результат вимірювання для компенсації інструментальної похибки: $X = X_{в} + \sigma$.

МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ

Приклад 1.1. Амперметр з верхньою межею вимірювання $I_N = 10$ А, числом поділок шкали $\alpha_{max} = 100$ має клас точності 0,5. Під час вимірювання стрілка приладу відхилилась на 55 поділок. Визначити абсолютну і відносну похибку вимірювання, записати інтервал дійсного значення струму.

Розв'язання.

Обчислюємо ціну поділки амперметра:

$$C_A = \frac{I_N}{\alpha_{max}} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ A/под.}$$

Тоді вимірне значення струму:

$$I = C_A \cdot \alpha = 0,1 \cdot 55 = 5,5 \text{ A.}$$

Абсолютна похибка вимірювання:

$$\Delta = \frac{K \cdot I_N}{100\%} = \frac{0,5 \cdot 10}{100} = 0,05 \text{ A.}$$

Відносна похибка вимірювання:

$$\delta = \frac{\Delta}{I \cdot 100\%} \cdot 100\% = \frac{0,05}{5,5} \cdot 100\% = 0,91\%.$$

Інтервал дійсного значення струму:

$$I_{\delta} = I \pm \Delta = 5,5 \pm 0,05 \text{ A.}$$

Приклад 1.2. Для вимірювання опору непрямим методом використали два прилади: амперметр М253; магнітоелектричний; класу точності $\gamma_A = 0,5$; $I_{NA} = 0,75 \text{ A}$; $U_A = 39 \text{ мВ}$ і вольтметр М253; магнітоелектричний; класу точності $\gamma_V = 0,5$; $U_{NV} = 75 \text{ В}$; $I_V = 0,75 \text{ мА}$. Покази приладів $U = 33 \text{ В}$, $I = 0,7 \text{ А}$. Вибрати схему

Визначимо відношення частот двох сигналів.

Для сигналу $u(t) = U \sin(\omega t + \varphi_0)$ $\omega = 2\pi f$, тоді:

$$f_x = f_y = 2\omega/2\pi = \omega/\pi \text{ і } f_x/f_y = 1.$$

Фазовий зсув між сигналами:

$$\varphi_{0x} - \varphi_{0y} = \pi/2 = 90^\circ.$$

Згідно з табл. 1. будемо фігуру Ліссажу (рис.7.4,б), причому:

$$n_y = U/m_y; \quad n_x = U/m_x,$$

де m_y , m_x - коефіцієнти перемикачів вертикального і горизонтального підсилення.

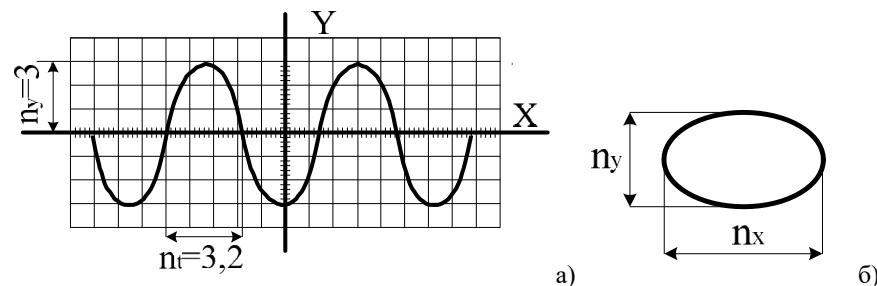


Рис. 7.4. Осцилограма сигналу до прикладів 7.1. і 7.2.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. За осцилограмою (рис.7.5, а), обчислити амплітуду, період і частоту сигналу, якщо перемикачі вертикального та горизонтального підсилення знаходяться в положенні $m_y = 2$ В/под., $m_x = 5$ мс/под. Визначити абсолютну і відносну похибки вимірювання максимального значення напруги, якщо клас точності осцилографа 5.

2. В режимі неперервної лінійної розгортки на вхід Y осцилографа подається синусоїдальна напруга з періодом 40 мкс. Перемикач горизонтального підсилення час/под., знаходиться в положенні 5 мкс/под. Накресліть, як виглядатиме осцилограма. Розрахуйте частоту сигналу.

3. При вимірюванні частоти за допомогою фігур Ліссажу була отримана осцилограма у вигляді горизонтальної вісімки. Частота зразкового генератора, підключеного до входу Y осцилографа 500 Гц. Визначити вимірювану частоту.

4. На вхід осцилографа подається синусоїдний сигнал з періодом 500 мкс. Нехтуючи часом зворотного ходу променя, визначити частоту неперервної лінійної розгортки для отримання осцилограми у вигляді 5 періодів досліджуваного сигналу.

5. До пластин X і Y підведені сигнали синусоїдної форми, однакові по частоті, фазі і піковому значенню. Побудуйте фігуру Ліссажу, що отримається на екрані, якщо чутливість відхилення променя по вертикалі і горизонталі однакова.

Рис. 7.3. Визначення частоти по фігурі Ліссажу

4. Вимірювання зсуву фаз.

Для вимірювання зсуву фаз між двома синусоїдними сигналами першочергово на вхід Y подають опорний сигнал при увімкненій зовнішній синхронізації. Зображення сигналу встановлюють симетрично нульовій лінії шкали. Регуляторами встановлюють перетин синусоїди з нульовою лінією шкали в початок розгортки і визначають тривалість періоду опорного сигналу в поділках шкали (l_1). Потім на вхід " Y " подають сигнал, фазу якого необхідно виміряти, і відраховують зміщення перетину зображення сигналу з нульовою лінією шкали в поділках (l_2).

Зсув фаз визначають за формулою:

$$\varphi = \frac{l_2}{l_1} \cdot 360^\circ. \quad (7)$$

Точність вимірювання параметрів напруг та струмів за допомогою осцилографа є порівняно невисокою, всього 5-10% і залежить від властивостей ЕПТ і підсилювача вертикального відхилення електронного променя.

МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ

Приклад 7.1. За осцилограмою, отриманою на екрані осцилографа (рис.7.4, а), обчислити амплітуду, період і частоту сигналу, якщо перемикачі вертикального та горизонтального підсилення знаходяться в положенні $m_y = 2$ В/под., $m_x = 5$ мс/под. Визначити абсолютну і відносну похибки вимірювання максимального значення напруги, якщо клас точності осцилографа $K = 5$.

Розв'язання.

За осцилограмою знаходимо максимальне значення напруги:

$$U_m = m_y \cdot n_y = 2 \cdot 3 = 6 \text{ В.}$$

Період і частота сигналу:

$$T = m_x \cdot 2n_x = 5 \cdot 2 \cdot 3,2 = 32 \text{ мс, } f = 1/T = 1/32 \cdot 10^{-3} = 31,25 \text{ Гц.}$$

Межа вимірювання при заданому положенні перемикача вертикального підсилення:

$$U_N = m_y \cdot n_{y,\max} = 2 \cdot 4 = 8 \text{ В.}$$

Тоді похибки вимірювання:

$$\Delta U_{\max} = \frac{K \cdot U_N}{100\%} = \frac{5 \cdot 8}{100} = 0,4 \text{ В; } \delta_U = \frac{\Delta U_{\max}}{U} \cdot 100\% = \frac{0,4}{6} \cdot 100 = 6,7\%.$$

Приклад 7.2. На вхід каналу вертикального відхилення осцилографа подано синусоїдний сигнал $u_x(t) = U \sin(2\omega t + \pi/2)$, а на вхід каналу горизонтального відхилення - $u_y(t) = U \sin 2\omega t$. Канал X працює в режимі зовнішньої розгортки. Побудувати зображення, очікуване на екрані осцилографа.

Розв'язання.

вимірювання, що забезпечувала б найменшу методичну похибку та визначити в яких межах знаходиться дійсне значення вимірюваного опору R_x .

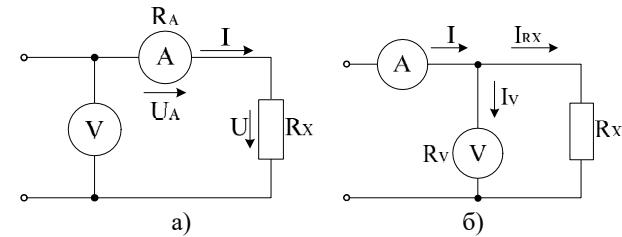


Рис.1.1. Вимірювання опору: а) за схемою правильного вимірювання струму; б) за схемою правильного вимірювання напруги.

Розв'язання.

Значення опору згідно показів приладів:

$$R = U / I = 33 / 0,7 = 47,14 \text{ Ом.}$$

Внутрішні опори приладів:

$$R_A = \frac{U_A}{I_{NA}} = \frac{39 \cdot 10^{-3}}{0,75} = 0,052 \text{ Ом, } R_V = \frac{U_{NV}}{I_V} = \frac{75}{0,75 \cdot 10^{-3}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Ом.}$$

Визначимо методичні похибки вимірювання опору для обох схем.

Абсолютна методична похибка вимірювання для схеми рис.1.1,а:

$$\Delta'_M = R - R_d = (U_R + U_A) / I - U / I = R + R_A - R = R_A = 0,052 \text{ Ом.}$$

Відносна методична похибка вимірювання для схеми рис.1.2,а):

$$\delta'_M = \frac{\Delta'_M}{R} \cdot 100\% = \frac{R_A}{R} \cdot 100\% = \frac{0,052}{47,14} \cdot 100\% = 0,11\%.$$

Відповідно абсолютна і відносна методичні похибки для схеми рис.1.1,б):

$$\Delta''_M = R - R_d = \frac{U}{(I_R + I_V)} - \frac{U}{I} = \frac{U}{\frac{U}{R} + \frac{U}{R_V}} - R = \frac{R \cdot R_V}{R_V + R} - R = \frac{-R^2}{R_V + R} = -0,022 \text{ Ом.}$$

$$\delta''_M = \frac{|\Delta''_M|}{R} \cdot 100\% = \frac{R}{R_V + R} \cdot 100\% = \frac{47,14}{10^5 + 47,14} \cdot 100\% = 0,047\%$$

Отже вибираємо схему вимірювання опору за схемою правильного вимірювання напруги (рис.1.1,б).

Визначимо похибки приладів:

$$\Delta_A = \frac{\gamma_A \cdot I_{NA}}{100\%} = \frac{0,5 \cdot 0,75}{100\%} = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ А; } \delta_A = \frac{\Delta_A}{I} \cdot 100\% = \frac{3,75 \cdot 10^{-3}}{0,7} \cdot 100\% = 0,5\%$$

$$\Delta_V = \frac{\gamma_V \cdot U_{NV}}{100\%} = \frac{0,5 \cdot 75}{100\%} = 0,375 \text{ В; } \delta_V = \frac{\Delta_V}{U} \cdot 100\% = \frac{0,375}{33} \cdot 100\% = 1,13\%$$

Сумарна відносна похибка непрямого вимірювання опору (за табл. 1.):

$$\delta_{sp} = \delta_A + \delta_V + \delta''_M = 0,5 + 1,13 + 0,047 \approx 1,7\%$$

Абсолютна похибка вимірювання:

$$\Delta_{ep} = \frac{\delta_{ep} \cdot R}{100\%} = \frac{1,7 \cdot 47,14}{100\%} = 0,8 \text{ Ом.}$$

Дійсне значення опору:

$$R_x = R \pm \Delta_{ep} = 47,14 \pm 0,8 \text{ Ом.}$$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Виміряне значення опору $R = 150 \text{ Ом}$, границя допустимої відносної похибки вимірювання $\delta = 1,0 \%$. Знайдіть інтервал, в якому повинне знаходитися $R\delta$ — дійсне значення опору.

2. При повірці амперметра прилад показав $I_A = 80 \text{ mA}$, а зразковий амперметр $I = 83 \text{ mA}$. Кінцеве значення шкали повіреного приладу $I_N = 150 \text{ mA}$. Знайти абсолютну, відносну і зведену похибку приладу.

3. Вольтметр з максимальним показом $U_N = 300 \text{ В}$ має рівномірну шкалу на 100 поділок, його клас точності позначений $\gamma_v = 0,5$. Визначити ціну поділки і границі абсолютної допустимої похибки.

4. Основна зведена похибка амперметра з максимальним відхиленням стрілки 5 A , рівна $0,5\%$. Оцінити абсолютну і відносну похибки вимірювання, якщо показ приладу рівний 1 A , записати інтервал дійсного значення величини.

5. Амперметр, клас точності якого $1,5$ має кінцеве значення шкали 300 mA . Визначити діапазон значень струму, в якому відносна похибка не перевищить 5% .

6. Відомі абсолютна і відносна похибки вимірювання – 5 Ом і 10% . Визначити виміряне значення опору і записати межі дійсного його значення.

7. Для схеми, зображеної на рисунку 1.2,а, ($E = 23 \text{ В}$, $R = 167 \text{ Ом}$) вибрати амперметр та розрахувати допустиму граничну похибку вимірювання струму, враховуючи внутрішній опір приладу.

8. Для схеми, зображеної на рисунку 1.2,б, ($E = 10 \text{ В}$, $R_1 = 301 \text{ Ом}$, $R_2 = 215 \text{ Ом}$) вибрати вольтметр і розрахувати допустиму граничну похибку вимірювання напруги, враховуючи внутрішній опір приладу.

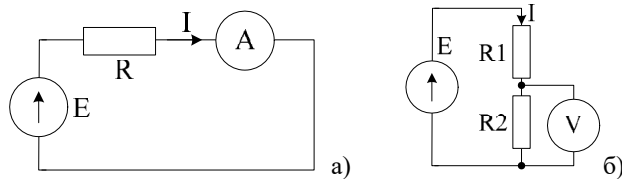


Рис. 1.2 До задач 7 і 8.

1. Вимірювання амплітуди сигналу в режимі лінійної розгортки.

Для вимірювання амплітуди досліджуваного сигналу U_m необхідно за допомогою ручок підсилювачів встановити на екрані стійке зображення одного чи кількох періодів сигналу.

Величина амплітуди досліджуваного сигналу в мілівольтах буде рівна добутку виміряної величини зображення в поділках n_U , помножену на чутливість підсилювача k_{II} (у відповідності з натисненою кнопкою чутливості) і на кратність вхідного атенюатора k_D .

$$U_m = n_U \cdot k_{II} \cdot k_D = n_U \cdot m_y. \quad (3)$$

2. Вимірювання інтервалів часу. Кнопки тривалості розгортки і множника тривалості встановлюють в таке положення, щоб вимірюваний інтервал часу займав довжину на екрані не менше чотирьох поділок шкали. Величина інтервалу визначається добутком трьох величин: довжини вимірюваного інтервалу часу на екрані в поділках шкали часу n_t , на значення однієї поділки шкали l_t в відповідності з натисненою кнопкою тривалості розгортки і значення коефіцієнта тривалості розгортки k_p в відповідності з положенням кнопок "0,5" і "0,2" (обидві кнопки відпущені – коефіцієнт розгортки рівний 1, натиснута кнопка "0,5" – відповідає коефіцієнту 0,5; натиснута кнопка "0,2" – відповідає коефіцієнту 0,2):

$$t_x = n_t \cdot l_t \cdot K_p = n_t \cdot m_x. \quad (4)$$

3. Вимірювання частоти.

Частота сигналу f в режимі лінійної розгортки визначається:

$$f = \frac{n}{l \cdot T_p}, \quad (5)$$

де f – частота сигналу, Гц;

n – ціле число періодів сигналу, які найближче вкладаються в 10 поділок шкали;

l – число поділок шкали, яке займає ціле число періодів сигналу n ;

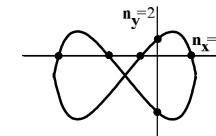
T_p – тривалість розгортки, при якій відбувається вимірювання частоти сигналу, с.

Частота сигналу f в режимі синусоїдальної розгортки (зовнішня синхронізація) визначається порівнянням частот сигналів поданих на входи X і Y осцилографа по отриманій на екрані фігури Ліссажу (табл.1). Якщо фігура нерухома, то справедливе відношення:

$$f_y = f_x \cdot \frac{n_x}{n_y}, \quad (6)$$

де f_y і f_x - відповідно частота сигналу, подана на входи X і Y осцилографа;

n_x і n_y - максимальна кількість перетинів фігури Ліссажу з горизонтальною і вертикальною прямими перерізу (прямі не повинні проходити через вузли фігури).



називається **синхронізацією**. Для здійснення зовнішньої синхронізації до генератора розгортки подається синхронізуючий сигнал від мережевої напруги 220 В, 50 Гц. Для внутрішньої – в момент переходу досліджуваної напруги $U_y(t)$ через нуль на вхід схеми синхронізації подається короткий імпульс, що запускає генератора розгортки.

На вхід підсилювача горизонтального відхилення крім напруги розгортки можна подавати напруги від інших джерел – **режим зовнішньої розгортки**. При цьому генератор пилкоподібної напруги від входу підсилювача відключається. Якщо подавати на вхід Y і X синусоїдні напруги, то на екрані висвічуються так звані фігури Ліссажу (таблиця 1), форма яких залежить від співвідношення частот, фаз і амплітуд поданих напруг.

Таблиця 1

Приклади фігур Ліссажу на екрані осцилографа при синусоїдній розгортці

$\frac{f_y}{f_x}$	Фазовий зсув між сигналами на входах X і Y				
	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
$\frac{1}{1}$					
$\frac{1}{2}$					
$\frac{1}{3}$					
$\frac{2}{3}$					
$\frac{3}{4}$					

Для вимірювання параметрів сигналів за допомогою осцилографа необхідно знати масштаби їх зображень по вертикальній та горизонтальній осях екрана осцилографа m_y та m_x (ці масштаби ще називаються коефіцієнтами відхилення вертикального та горизонтального каналів і визначаються положеннями ручок подільників напруги k_d (атенюаторів), які знаходяться перед підсилювачами вертикального (Y) та горизонтального (X) відхилення, і коефіцієнтами підсилення підсилювачів k_n).

9. Вибрати прилади (амперметр і вольтметр) та схему вимірювання опору з похибкою не більшою $\delta_R = 1,5\%$. Розрахункові значення струму та напруги в колі $I = 9,5A$, $U = 4V$.

10. Для вимірювання напруги 220 В взяли два вольтметри, з'єднані послідовно. Перший вольтметр має межу вимірювання 150 В, внутрішній опір 12 кОм, клас точності 0,5; другий вольтметр з межею вимірювання 120 В має внутрішній опір 10 кОм, клас точності 0,5. Визначте покази кожного вольтметра і найбільші абсолютну і відносну похибки.

11. Після ремонту щитового вольтметра (клас точності $K = 1,5$; $U_{NV} = 150$ В) здійснили перевірку приведеної похибки приладу. Найбільша абсолютна похибка $\Delta U_{\max} = 2,1$ В зафіксована на позначці шкали $U = 120$ В. Чи відповідає вольтметр заданому класу точності?

12. Маємо $\textcircled{0,2}$ три засоби вимірювань: ЗВ1, ЗВ2, ЗВ3. Позначення їх класів точності відповідно – 1,0; ; 0,1/0,05.

Запишіть для кожного з даних засобів вимірювання вирази граничних значень для основної абсолютної, відносної і зведеної похибок. При цьому значення вимірюваної величини X , а нормуюче значення X_N .

13. Вольтметром класу точності 0,5 з діапазоном показів (0..0,3)В, шкалою на 150 поділок і вхідним опором 10кОм вимірюється напруга постійного струму на затискачах джерела, що має вихідний опір 100 Ом. Відлік по шкалі приладу становить 131 поділку. Записати результат вимірювання.

Примітка: Технічні дані амперметрів та вольтметрів наведені в додатку 1 і 2.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що називають систематичною похибкою вимірювання?
2. Які існують форми виразу систематичної похибки?
3. Як розраховується абсолютна і відносна похибка вимірювання?
4. Як здійснюється вибір приладів для проведення вимірювань?
5. Як розрахувати методичні похибки вимірювання? В яких одиницях вони вимірюються?
6. Як впливає внутрішній опір приладів на результат вимірювання?
7. Чим визначається зведена похибка вимірювання?
8. Як записати дійсне значення вимірюваної величини?
9. Що таке гранично допустиме значення похибки?
10. Вкажіть існуючі види позначення класів точності вимірювальних приладів.

Лабораторна робота №2 МЕТРОЛОГІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ БАГАТОКРАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Похибкою результату вимірювання (або похибкою вимірювання) називається відхилення результату вимірювання від дійсного значення вимірюваної величини.

Всі похибки вимірювань містять в собі систематичну і випадкову складові, що називаються також систематичною і випадковою похибками $\Delta = \Delta_C + \Delta_B$.

Систематичними називають похибки, які залишаються постійними або закономірно змінюються при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини.

Випадковими називаються похибки, що змінюються випадковим чином при повторних вимірюваннях тієї ж величини.

На відміну від систематичних, випадкові похибки не можна заздалегідь виявити і усунути. Вони можуть бути зменшені при багатократних спостереженнях однієї і тієї ж величини, фільтрацією похибок і ін. При цьому необхідно на основі певного ряду значень отримати найкраще наближення вимірюваної величини до її істинного значення.

При вимірюванні ці похибки виявляються спільно, внаслідок чого сукупність результатів вимірювання утворює нестационарний, випадковий процес.

Для характеристики випадкового процесу визначають інтегральну і диференціальну функції розподілу імовірності випадкової величини.

Інтегральна функція розподілу показує імовірність того, що випадкова величина X знаходиться в інтервалі від $-\infty$ до деякого значення, меншого x_1 , при цьому функція є неспадаюча і $F(-\infty) = 0$, а $F(+\infty) = 1$.

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x_1} f(x) dx \quad (1)$$

Диференціальна функція (густина імовірності) показує імовірність того, що випадкова величина X набуде значення в інтервалі між x_1 і x_2 , і рівна:

$$P(x_1 < x < x_2) = F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (2)$$

У практиці електровимірювань найчастіше мають справу з нормальним законом розподілу. Випадкова величина x розподілена нормально (за законом Гаусса), якщо її густина імовірності має вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

де σ_x – середнє квадратичне відхилення (СКВ), m_x – математичне очікування випадкової величини. Функція показує розсіювання результатів навколо деякого середнього значення, і повністю характеризується середнім квадратичним

положення, щоб у наступний проміжок часу прямого ходу повторити переміщення променя по екрану зліва направо.

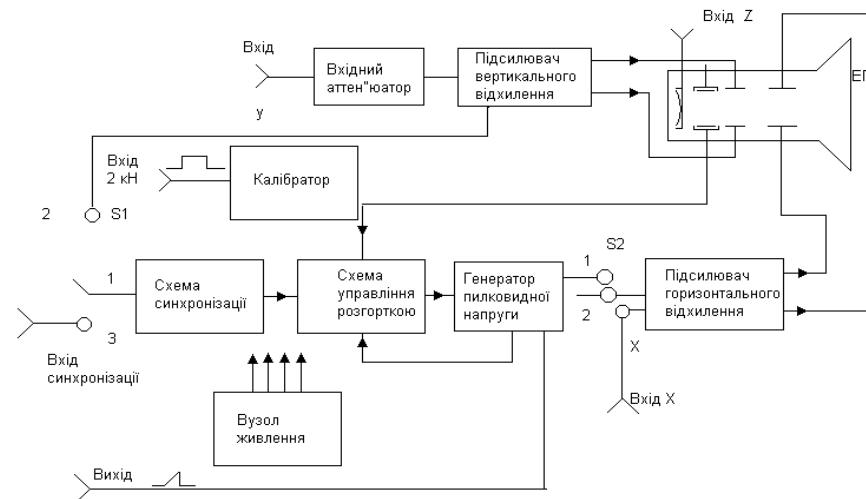


Рис. 7.1. Спрощена структурна схема осцилографа

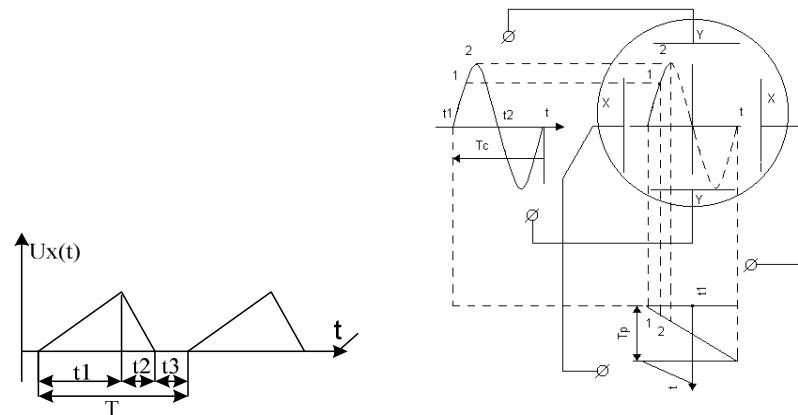


Рис. 7.2. а) форма напруги розгортки; б) досліджувана напруга на екрані в ЕПТ в режимі лінійної розгортки

Частоту розгортки можна міняти, підбираючи її так, щоб зображення на екрані буде нерухомим і зручним для спостереження - для цього служать схеми синхронізації та управління розгорткою. Для цього період напруги розгортки T повинен бути кратним періоду досліджуваної напруги $U_y(t)$ (тобто період T_p на рис. 7.2,б повинен бути рівним або в ціле число разів більший від періоду T_c). Примусова генерація генератором розгортки напруги з частотою, яка дорівнює або кратна частоті досліджуваного сигналу,

Лабораторна робота №7
ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЕРІОДИЧНИХ СИГНАЛІВ ЗА
ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ОСЦИЛОГРАФА

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Будова та принцип дії електронно-променевого осцилографа

Осцилограф є складним електронним приладом, призначеним для дослідження (спостереження і запису) форми електричних напруг та вимірювання їх параметрів.

Одним із основних вузлів осцилографа є електронно-променева трубка ЕПТ (рис.7.1). ЕПТ складається з електронної гармати, електродів для управління яскравістю і фокусом, відхиляючих пластин і флуоресцентного екрана. Поблизу екрану встановлений анод, на який подається висока позитивна напруга. Під дією цієї напруги електрони, що вириваються з електронної гармати, рухаються від катода до анода, попадають на екран і висвічують точку у флуоресцентному шарі. Для одержання зображення досліджуваної напруги на екрані осцилографа в ЕПТ розміщено дві пари пластин: вертикально- та горизонтально відхиляючі пластини (Y-Y та X-X). Одна пара відхиляє промінь в горизонтальному напрямі (електроди X), а інша – у вертикальному (електроди Y). Відхилення світлової точки в координатах x та y пропорційне напругам U_x та U_y , що подаються на пластини.

Якщо на обох парах пластин напруга відсутня, то потік електронів (електронний промінь) від катода попаде в центр екрану. Якщо на вхід Y осцилографа подається досліджувана напруга $U_Y(t)$, то вертикальна координата світної точки буде пропорційна значенню досліджуваної напруги:

$$y = S_Y U_Y(t), \quad (1)$$

де S_Y — чутливість осцилографа по осі Y.

Чутливість ЕПТ, що використовуються в універсальних осцилографах, складає 0,2...0,5 мм/В. Тому СКЗ напруги, яка подається на пластини, повинне бути не менше ніж 100...250 В, щоб викликати переміщення точки на екрані на 50 мм.

Канал горизонтального відхилення (канал X) містить генератор розгортки пилкоподібної напруги та підсилювач горизонтального відхилення. Канал X може працювати в двох режимах — розгортки або підсилення сигналу, поданого на вхід Y.

В режимі розгортки напруга генератора розгортки через підсилювач подається на вхід горизонтально відхиляючих пластин і регулює зміщення променя на екрані по осі X. Щоб отримати на екрані криву досліджуваної напруги $U_Y(t)$ необхідно, щоб напруга $U_X(t)$ змінювалась в часі лінійно. Тому напруга розгортки має пилкоподібну форму (рис. 7.2, а), і горизонтальна координата світної точки визначається, як:

$$x = S_X U_X(t), \quad (2)$$

де S_X - чутливість осцилографа на осі X.

Проміжок часу $t1$ називають часом прямого (робочого) ходу променя. Протягом цього часу під дією лінійно змінної напруги $U_X(t)$ світлова точка переміщується екраном зліва направо з рівномірною швидкістю і створює на ньому суцільну лінію (рис. 7.2, б). Протягом часу $t2$ (зворотного ходу) промінь повертається справа наліво у початкове

відхиленням (рис. 2.2.б). Чим менше значення СКВ, тим частіше зустрічаються малі випадкові похибки, тобто тим точніше виконані вимірювання.

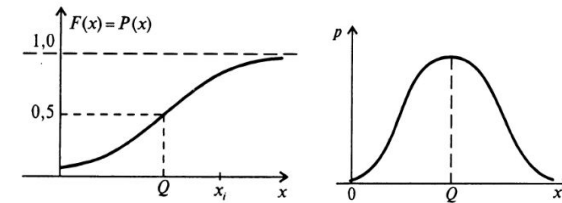


Рис 2.1. Інтегральна і диференціальна функції нормального розподілу імовірності результатів вимірювання.

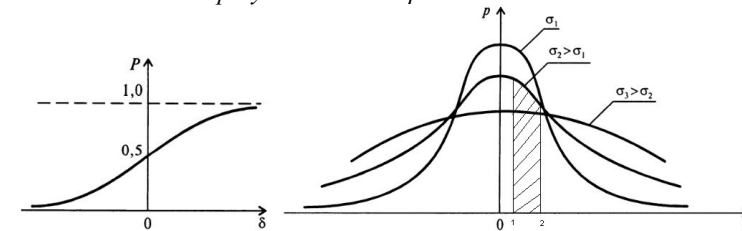


Рис 2.2. Інтегральна і диференціальна функції нормального розподілу імовірності похибок вимірювання.

Імовірність появи випадкової величини в інтервалі $x_1 < x < x_2$ визначається

площею заштрихованої ділянки (рис 2.б) і визначається як визначений інтеграл від функції (3) в межах (x_1, x_2) . Інтеграл не обчислюється в елементарних функціях, його обчислюють за допомогою таблиць. Для спрощення запису здійснюють заміну змінних:

$$t = \frac{x - m_x}{\sigma}, \quad \text{тоді } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-0,5t^2} dt. \quad (4)$$

Тоді імовірність попадання результатів вимірювання (або їх похибок) в інтервал $x_1 < x < x_2$ обчислюється за відомими значеннями t_1 і t_2 через табличні значення Φ_1 і Φ_2 (таблиця 2.):

$$P(x_1 < x < x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1). \quad (5)$$

Способи знаходження оцінок ряду спостережень і показники їх якості залежать від законів розподілу. Для нормального розподілу, як і для всіх симетричних розподілів, як оцінку **математичного очікування** ряду n спостережень приймають середнє арифметичне ряду спостережень:

$$m_x = \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (6)$$

Величина відхилення результату одиничного вимірювання від середнього значення $\Delta_i = X_i - \bar{x}$ є випадковою похибкою і може бути додатною або від'ємною.

Якщо систематична похибка Δ_C відсутня, то за результат вимірювання беруть математичне очікування випадкової величини:

$$\bar{x} = X_B. \quad (7)$$

Оцінка відхилення результату одного спостереження X_i від дійсного значення називається **дисперсією** і обчислюється за формулою:

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \text{ де } \sum_{i=1}^n v_i = 0 \quad (8)$$

Тоді **середнє квадратичне відхилення однократного вимірювання**:

$$\sigma[x] = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}. \quad (9)$$

Середнє арифметичне значення теж залежить від числа спостережень і є випадковою величиною, яка володіє деякою дисперсією відносно дійсного значення величини X_0 . Тоді оцінкою середнього квадратичного для середнього арифметичного ряду спостережень відносно дійсного значення (тобто відхилення $m_x = \bar{x}$ при повторних вимірюваннях) є:

$$\sigma[\bar{x}] = \frac{\sigma[x]}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n v_i^2} = S, \quad (11)$$

S – середнє квадратичне відхилення результату вимірювань.

Отже, збільшення кількості вимірювань n веде до зменшення СКВ результату вимірювань.

Оцінки $\sigma[x]$ і $\sigma[\bar{x}]$ є так званими **точковими оцінками** вимірюваної величини. Вони вказують інтервал значень вимірюваної величини, усередині якого знаходиться дійсне значення: $X_d = \bar{x} \pm \sigma[\bar{x}]$.

На відміну від точкової при **інтервальній оцінці** визначається довірчий інтервал ε_p , в якому з довірчою імовірністю P знаходиться дійсне значення X_0 :

$$\varepsilon_p = \pm t_p \sigma(\bar{x}). \quad (12)$$

При заданій імовірності P і обчисленому $\sigma(\bar{x})$ значення t_p визначається законом розподілу. В випадку нормального розподілу і числа вимірювань $n > 20$ вибирається по таблиці функцій Лапласа. Якщо число вимірювань $n < 20$, то довірчий інтервал випадкової величини визначається по формулі Стьюдента:

$$\varepsilon_p = \pm t_{p,n} \sigma(\bar{x}), \quad (13)$$

де $t_{p,n}$ – коефіцієнт розподілу Стьюдента, який залежить від заданої імовірності P і числа вимірювань n (таблиця 1).

Таким чином при інтервальній оцінці **результат вимірювання** записується у вигляді $X_d = \bar{x} \pm t_p S$, при $P = \dots\%$. Як правило, приймають $P = 0,95$. Якщо ж вимірювання не можна повторити, то приймають $P = 0,99$, а в особливо відповідальних випадках ще вище.

потужність, вимірювана ватметрами, складає 807 Вт. Визначте покази кожного ватметра, $\cos \phi$ кола. Наведіть схему.

8. В трифазному колі з рівномірним навантаженням активна потужність вимірюється за схемою одного ватметра. Показ ватметра – 85 поділок. Номінальний струм ватметра 10 А, напруга – 300 В, шкала – на 150 поділок. Лінійна напруга кола 220 В, лінійний струм – 8,5 А. Визначте реактивну, активну потужності і $\cos \phi$ трифазного кола. Наведіть схему.

9. Ватметр на напругу 220 В і струм 5 А ввімкнений через трансформатор струму 300/5 до трифазного кола з рівномірним навантаженням. Наведіть схему і визначте потужність трифазного кола, якщо ватметр показує 250 Вт.

10. Ввімкнені до трифазного кола з рівномірним навантаженням через трансформатори струму 200/5 і напруги 6000/100 прилади дають такі покази: вольтметр – 105 В; амперметр – 3,6 А; ватметри $P_1 = 42$ Вт, $P_2 = 350$ Вт. Визначте значення струму, напруги, потужності і $\cos \phi$ кола. Наведіть схеми.

Примітка: Основні технічні дані амперметрів та вольтметрів електромагнітної системи наведені в додатку 2, а ватметрів - в додатку 4.

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) - \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta);$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) + \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta).$$

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Опишіть прямий і непрямий методи вимірювання потужності.
2. Як визначається методична похибка вимірювання потужності амперметром і вольтметром?
3. Як вибрати ватметр для прямого вимірювання потужності?
4. Чому дорівнює ціна поділки ватметра?
5. Наведіть схеми вмикання ватметра.
6. Чому виникає методична похибка при вимірюванні потужності ватметром. Як вона обраховується?
7. Як визначається повна і реактивна потужності в колі змінного струму?
8. В якому випадку потужність трифазного кола вимірюється одним ватметром?
9. Чому дорівнює активна потужність трифазного кола при вимірюванні методом двох і трьох ватметрів?

$$\delta_p = \delta_w + \delta_M'' = 0,62 + 0,04 = 0,66\% ; \Delta_p = \frac{\delta_p \cdot P_x}{100\%} = \frac{0,66 \cdot 607,5}{100\%} = 4 \text{ Вт.}$$

Приклад 6.2. Ватметр Д5004/2; $\gamma_w = 0,5$; $U_{NW} = 150 \text{ В}$; $I_{NW} = 5 \text{ А}$; $\cos\varphi_w = 1,0$; $I_{UW} = 5,0 \text{ мА}$; $R_{IW} = 0,011 \text{ Ом}$ ввімкнений через трансформатор напруги 1000/100 і трансформатор струму 100/5 до трифазного кола з рівномірним навантаженням. Визначте потужність трифазного кола, якщо ватметр показує 250 Вт.

Розв'язання.

Коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів:

$$k_I = \frac{100}{5} = 20; k_U = \frac{1000}{100} = 10.$$

Значення потужності однієї фази:

$$P' = P_w \cdot k_I \cdot k_U = 250 \cdot 10 \cdot 20 = 50 \cdot 10^3 \text{ Вт,}$$

Тоді потужність трифазного кола: $P = 3P' = 150 \text{ кВт.}$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Визначити найбільшу можливу відносну похибку вимірювання потужності ватметром з межею вимірювання 750 Вт, класом точності 0,5 і шкалою на 150 поділок, якщо покази ватметра дорівнюють 60 поділок. Визначити чутливість ватметра і навести схему його вмикання.

2. На розподільчому щитку однофазного струму встановлений вольтметр на 150 В, амперметр на 5 А зі шкалами на 150 і 100 поділок і ватметр на 150 В і 5 А зі шкалою на 150 поділок. Амперметр і ватметр включені через трансформатор струму 50/5. Накресліть схему і визначте первинний струм, потужність і $\cos\varphi_w$, якщо стрілка амперметра показує 80 поділок, вольтметра – 120 поділок, ватметра – 50 поділок.

3. Значення струму і напруги короткого замикання однофазного трансформатора дорівнюють $I_K = 67 \text{ А}$, $U_K = 380$, $\cos\varphi_w = 1,0$. Вибрати ватметр для вимірювання потужності короткого замикання трансформатора, записати значення ціни поділки ватметра.

4. В досліджуваному колі однофазного струму значення струму, напруги і коефіцієнт потужності складають відповідно $I = 77 \text{ А}$, $U = 750 \text{ В}$, $\cos\varphi_w = 1,0$. Вибрати прилади для вимірювання активної потужності споживача, розрахувати активну, реактивну і повну потужність. Накреслити схему вимірювання.

5. У трифазному колі потужність вимірюється за схемою двох ватметрів. Навантаження фаз рівномірне. Фазний струм 5 А, лінійна напруга 380 В. Сумарна потужність, виміряна ватметрами, складає 206 Вт. Визначте покази кожного ватметра. Наведіть схему.

6. У трифазному колі з рівномірним навантаженням включені два ватметри. Напруга мережі 220 В. Покази ватметрів: $P_1 = 675 \text{ Вт}$, $P_2 = 325 \text{ Вт}$. Наведіть схему, визначте коефіцієнт потужності і струм в колі.

7. В трифазному колі з рівномірним навантаженням потужність вимірюють за схемою двох ватметрів, лінійний струм складає 5 А, лінійна напруга – 120 В, повна

Таблиця коефіцієнтів Стьюдента $t_{P,n}$.

n \ P	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
20	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9
40	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,6
∞	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Таблиця 2.

Інтегральна функція нормального розподілу $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-0,5t^2} dt$

t	$\Phi(x)$	t	$\Phi(x)$	t	$\Phi(x)$	t	$\Phi(x)$
-3,5	0,00023	-1,7	0,0446	+0,0	0,5000	+1,8	0,9641
-3,4	0,00034	-1,6	0,0548	+0,1	0,5398	+1,9	0,9713
-3,3	0,00048	-1,5	0,0558	+0,2	0,5793	+2,0	0,9773
-3,2	0,00069	-1,4	0,0808	+0,3	0,6179	+2,1	0,9821
-3,1	0,00097	-1,3	0,0968	+0,4	0,6554	+2,2	0,9861
-3,0	0,00135	-1,2	0,1151	+0,5	0,6915	+2,3	0,9893
-2,9	0,0019	-1,1	0,1357	+0,6	0,7157	+2,4	0,9918
-2,8	0,0026	-1,0	0,1587	+0,7	0,7580	+2,5	0,9938
-2,7	0,0035	-0,9	0,1841	+0,8	0,7881	+2,6	0,9953
-2,6	0,0047	-0,8	0,2119	+0,9	0,8159	+2,7	0,9965
-2,5	0,0062	-0,7	0,2420	+1,0	0,8413	+2,8	0,9974
-2,4	0,0082	-0,6	0,2743	+1,1	0,8643	+2,9	0,9981
-2,3	0,0107	-0,5	0,3085	+1,2	0,8849	+3,0	0,99865
-2,2	0,0139	-0,4	0,3440	+1,3	0,9032	+3,1	0,99903
-2,1	0,0179	-0,3	0,3821	+1,4	0,9192	+3,2	0,99931
-2,0	0,0228	-0,2	0,4207	+1,5	0,9332	+3,3	0,99952
-1,9	0,0287	-0,1	0,4602	+1,6	0,9452	+3,4	0,99966
-1,8	0,0359	-0,0	0,5000	+1,7	0,9554	+3,5	0,99977

Виключення грубих похибок.

В деяких випадках виявляється, що результат одного вимірювання різко відрізняється від результатів інших вимірювань, виконаних за тих же контрольованих умов. В цьому випадку говорять про **грубу похибку (промах)**. Причиною можуть

статистична помилка оператора, поява значної короточасної перешкоди, поштовх, порушення електричного контакту і так далі. Такий результат, що містить грубу похибку необхідно виявити, виключити і не враховувати при подальшій статистичній обробці результатів вимірювань.

Згідно формули $\varepsilon_p = \pm t_p \sigma(\bar{x})$, для довірчого інтервалу $-3\sigma < \varepsilon_p < +3\sigma$, довірна імовірність рівна $\Phi(x) = \Phi(3) - \Phi(-3) = 0,9973$. Тобто імовірність появи похибки, більшої за 3σ рівна $1 - 0,9973 = 0,0027 \approx 1/370$. Така довірна імовірність означає, що з 370 випадкових похибок тільки одна по абсолютному значенню буде більша за 3σ . Тому 3σ вважається максимально можливою випадковою похибкою, похибки більше 3σ вважаються грубими і при обробці результатів вимірювань не враховуються.

Правила додавання похибок прямих спостережень.

Випадкова похибка вимірювального пристрою Δ_Σ , що складається з m блоків з випадковими похибками Δ_i кожного блоку, знаходиться шляхом геометричного додавання:

$$\Delta_\Sigma = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_i^2} \quad (14)$$

Аналогічно визначається відносна і граничні похибки, а також середньоквадратичне відхилення. Систематичні похибки Δ_{ci} додаються з врахуванням їх знаків, сумарна похибка $\Delta_{c\Sigma}$ є модулем отриманої суми:

$$\Delta_{c\Sigma} = \left| \sum_{i=1}^m \Delta_{ci} \right| \quad (15)$$

При наявності і випадкових і систематичних похибок загальна похибка $\Delta_{заг}$ приймається рівною їх геометричній сумі:

$$\Delta_{заг} = \sqrt{\Delta_\Sigma^2 + \Delta_{c\Sigma}^2} \quad (16)$$

МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ

Приклад 2.1. Проведено 10 вимірювань фізичної величини X_i , результати показані в таблиці:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X_i	20,5	20,7	18,6	19,4	20,2	21,1	20,4	21,1	20,2	22,3

Визначити:

- математичне очікування значення фізичної величини;
- оцінку СКВ результату вимірювання та
- інтервал дійсних значень вимірюваної величини;
- оцінку дійсного значення величини з довірчою імовірністю $P=0,6\%$, $P=0,99\%$;
- такі значення фізичної величини, що означали б появу грубої похибки.

При такому включенні кут між вектором струму послідовної обмотки і вектором напруги паралельної обмотки ватметра стає рівним ($90^\circ - \varphi$), а показ ватметра – пропорційним реактивній потужності фази. Такі схеми включення називають схемами із заміненою напругою. При вимірюванні реактивної потужності за схемами із заміненою напругою система напруги в колі повинна бути симетричною.

Значення **реактивної потужності трифазної мережі** у випадку повної симетрії три- або чотирипровідної мережі:

$$Q = 3U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin\varphi \quad \text{або} \quad Q = \sqrt{3}U_\lambda \cdot I_\lambda \cdot \sin\varphi \quad (16)$$

МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ

Приклад 6.1. В досліджуваному колі однофазного змінного струму значення струму, напруги і коефіцієнта потужності відповідно складають $I = 4,5\text{ А}$, $U = 135\text{ В}$, $\cos\varphi = 1,0$. Вибрати прилади і схему вимірювання потужності з мінімальним значенням методичної похибки. Визначити загальну похибку вимірювання.

Розв'язання.

За даними значеннями I_x , U_x , $\cos\varphi_x$ для прямого вимірювання потужності виберемо ватметр так, щоб $I_{NW} \geq I_x$, $U_{NW} \geq U_x$:

$$Д580/2; \quad \gamma_w = 0,2; \quad U_{NW} = 150\text{ В}; \quad I_{NW} = 5\text{ А}; \quad \cos\varphi_w = 1,0; \quad I_{UW} = 5,0\text{ мА};$$

$$R_{TW} = 0,011\text{ Ом}.$$

Методичні похибки вимірювання потужності:

$$\delta'_M = \frac{P_{UW}}{P_x} \cdot 100\% = \frac{0,607}{607,5} \cdot 100 = 0,1\% ;$$

$$\delta''_M = \frac{P_{TW}}{P_x} \cdot 100\% = \frac{0,223}{607,5} \cdot 100 = 0,04\% ,$$

$$\text{де } P_x = U_x \cdot I_x = 135 \cdot 4,5 = 607,5\text{ Вт}; \quad P_{UW} = U_x^2 / R_{UW} = 135^2 / 30 \cdot 10^3 = 0,607\text{ Вт};$$

$$R_{UW} = U_{NW} / I_{UW} = 150 / 5 \cdot 10^{-3} = 30 \cdot 10^3\text{ Ом}; \quad P_{TW} = I_x^2 \cdot R_{TW} = 4,5^2 \cdot 0,011 = 0,223\text{ Вт}.$$

Оскільки $\delta'_M > \delta''_M$, вибираємо схему (рис.6.4).

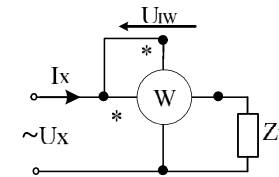


Рис. 6.4. Схема вимірювання потужності.

Основна похибка ватметра:

$$\delta_w = \gamma_w \cdot P_{NW} / P_x = 0,5 \cdot 750 / 607,5 = 0,62\% ,$$

де межа вимірювання ватметра:

$$P_{NW} = U_{NW} \cdot I_{NW} \cdot \cos\varphi_x = 150 \cdot 5 \cdot 1,0 = 750\text{ Вт}.$$

Тоді загальна похибка вимірювання:

1. Метод одного ватметра

Цей метод застосовується для вимірювання активної потужності в трифазних колах при рівномірному навантаженні фаз $Z_A = Z_B = Z_C$. Схема вмикання як для однофазного кола. Потужність кола визначають за формулою:

$$P = 3P_W; P_W = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi, \quad (12)$$

де φ – зсув фаз між струмом і напругою.

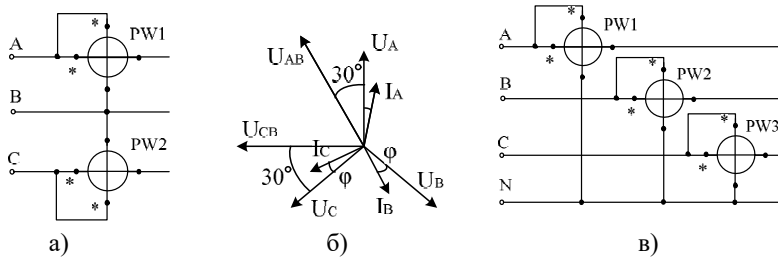


Рис. 6.3. Вимірювання активної потужності трифазного кола:

а) і б) метод двох ватметрів і векторна діаграма; в) метод трьох ватметрів

2. Метод двох ватметрів

Цей метод застосовується для вимірювання активної потужності в трифазних трипровідних колах як при рівномірному, так і при нерівномірному навантаженні незалежно від способу з'єднання споживачів енергії (рис.2.а). Загальна вимірювана потужність трифазного кола визначається в цьому випадку як сума показів обох ватметрів:

$$P = P_{W1} + P_{W2} \quad (13)$$

Враховуючи фазові зсуви між відповідними струмами і напругами у випадку повної симетрії (рис.6.3, б) можна записати:

$$P_{W1} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos(30^\circ + \varphi); P_{W2} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos(30^\circ - \varphi). \quad (14)$$

Тому покази ватметрів будуть однаковими лише при $\varphi=0$. В інших випадках вони будуть мати різні значення.

3. Метод трьох ватметрів

Цей метод застосовується для вимірювання активної потужності в трифазних колах з нейтральним провідником при нерівномірному навантаженні фаз. Кожен з ватметрів вимірює потужність однієї з фаз (рис.6.3, в).

Активна потужність визначається як сума показів трьох ватметрів:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}; P_W = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi \quad (15)$$

Вимірювання реактивної потужності в трифазних колах також може бути здійснене за допомогою звичайних однофазних ватметрів, включених в коло за особливими схемами. При цьому може бути використаний метод одного, двох і трьох ватметрів. Особливість вимірювальних схем полягає в тому, що паралельна обмотка кожного ватметра підключається з врахуванням кругового чергування фаз до тих лінійних провідників, в розриві яких не включена його послідовна (струмова) обмотка.

Розв'язання.

Математичне очікування вимірюваної величини:

$$m_x = \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{10}}{10} = 20,65$$

Середнє квадратичне відхилення результату вимірювання:

$$S = \sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n v_i^2} = \sqrt{\frac{1}{11 \cdot 10} \sum_{i=1}^n (20,65 - x_i)^2} = 0,24$$

Похибки вимірювання відповідно $\dot{\Delta}_i = X_i - \bar{x}$:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X _i	20,5	20,7	20,6	19,4	20,2	21,1	20,4	21,1	20,2	22,3
$\dot{\Delta}_i$	-0,15	0,05	-0,05	-1,25	-0,45	0,45	-0,25	0,45	-0,45	1,65

Виключимо можливість появи грубої похибки: $\dot{\Delta}_i < |3\sigma| = -0,72 \dots 0,72$.

Вимірювання № 4 і №10 включають грубу похибку, тому їх потрібно виключити з розрахунку. Перерахуємо значення \bar{x} і $\sigma(\bar{x})$:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_9}{8} = 20,6; \sigma(\bar{x}) = 0,125.$$

Тоді дійсне значення вимірюваної величини:

$$X_D = \bar{x} \pm S = 20,6 \pm 0,125$$

Оцінка дійсних значень вимірюваної величини в довірчому інтервалі: з імовірністю P=0,6%:

$$\varepsilon_p = \pm t_{p,n} \sigma(\bar{x}) = \pm 0,88 \cdot 0,125 = \pm 0,11, X_D = 20,6 \pm 0,11;$$

з імовірністю P=0,99%:

$$\varepsilon_p = \pm t_{p,n} \sigma(\bar{x}) = \pm 4,8 \cdot 0,125 = \pm 0,6, X_D = 20,6 \pm 0,6.$$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Випадкові похибки ряду вимірювань підлягають нормальному закону розподілу: $\dot{\Delta}_i = -1,7; 0,7; -1,4; 1,1; 0,4; 1,1; 2,3$. Визначити імовірність того, що величина похибки не перевищує ± 2 .

2. Відомий результат вимірювання $150 \pm 0,5\%$ при кількості вимірювань $n=20$, імовірності $P=0,98\%$ і нормальних умовах. Визначити середньоквадратичне відхилення результату вимірювання.

3. Чи входить результат вимірювання 0,16 мВ до ряду з 10 спостережень з імовірністю 0,95: -0,14; -0,12; -0,1; -0,06; -0,04; 0,00; 0,04; 0,06; 0,1; 0,12 мВ?

4. Результат вимірювання напруги в нормальних умовах рівний $225,3 \pm 1,5$ мВ, з довірчою імовірністю 0,95, число спостережень $n = 19$. Визначити середньоквадратичне відхилення результату вимірювання.

5. При вимірюванні струму в нормальних умовах проведений ряд спостережень в мА: 10,07; 10,10; 10,12; 10,15; 10,17; 10,20; 10,40. Перевірити чи результат 10,40 містить грубу похибку.

6. При вимірюванні опору прилад показав: 47,4; 48,6; 49,2; 49,8; 50,2; 50,8; 51,0; 52 Ом. Визначити імовірність попадання величини опору в інтервал 49..51 Ом.

7. При вимірюванні фізичної величини в нормальних умовах виконано 4 спостереження: 2,57; 2,59; 2,58; 2,60. Визначити таке найближче значення величини, яке означало б появу грубої похибки для даного ряду.

8. При вимірювання струму амперметром класу точності 0,5, з кінцевим значенням шкали 300А були отримані такі результати, А: 152,5; 153,8; 153,0; 152,3; 152,8; 153,2. Записати результат вимірювання з довірчою імовірністю 0,997.

9. При повірці амперметра класу точності 1,5 з діапазоном вимірювань 2,5А зразковим приладом в точці шкали 1А отримали такі покази: 1,05; 0,95; 1,1; 1,08; 1,05 А. Чи відповідає похибка приладу його класу точності з імовірністю 0,997.

10. Амперметром класу точності 0,5 з діапазоном вимірювань (0..1)А, зі шкалою на 100 поділок і вхідним опором 0,1 Ом кілька разів вимірюється струм джерела, що має вихідний опір 10 Ом. Відлік по шкалі приладу становить 75; 75,5; 73; 76 поділок. Записати результат вимірювання.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке систематична і випадкова похибки. Які є види запису цих похибок?
2. Що характеризує математичне очікування випадкової величини?
3. Що таке дисперсія?
4. Як розрахувати середньоквадратичне відхилення ряду вимірювань? Чим від нього відрізняється СКВ результату вимірювання?
5. Як знайти імовірність попадання випадкової величини в певний інтервал?
6. Чим відрізняються точкова і інтервальна оцінки дійсного значення величини?
7. Що таке довірчий інтервал?
8. Як виявити появу грубої похибки вимірювання?
9. Як записується результат вимірювання, якщо ряд виміряних величин містить грубу похибку?
10. Як записується результат вимірювання, що містить і систематичну і випадкову складові похибки?

R_{IW} - опір струмової обмотки ватметра;

R_V - опір вольтметра; R_A - опір амперметра.

Якщо в вимірювальній схемі використовується ВТС, то потужності, споживані струмовою обмоткою ватметра та амперметром визначаються за формулами:

$$P_{IW} = (I_x / n)^2 \cdot R_{IW}, \quad P_A = (I_x / n)^2 \cdot R_A, \quad (6)$$

де $n = I_{1H} / I_{2H}$ - коефіцієнт трансформації ВТС.

Якщо вольтметр і напругова обмотка ватметра вмикаються в вимірювальне коло послідовно з додатковим опором, то потужності, споживані приладами визначаються за формулами:

$$P_{UW} = \frac{U_x^2}{R_{UW} + R_{IW}}, \quad P_V = \frac{U_x^2}{R_V + R_{IV}}, \quad (7)$$

де $R_{IW}' = (U_{NW}' - U_{NW}) / I_{UW}$ - додатковий опір до ватметра;

U_{NW}' - нова межа вимірювання ватметра по напрузі ($U_{NW}' \geq U_x$);

$R_{IV}' = (U_{NV}' - U_{NV}) / I_V$ - додатковий опір до вольтметра;

U_{NV}' - нова межа вимірювання вольтметра ($U_{NV}' \geq U_x$);

$I_V = U_{NV} / R_V$ - струм повного відхилення вольтметра.

Визначення повної та реактивної потужності в однофазних колах.

Повна потужність споживача за схемою рис.6.2, а:

$$S_x = U_x I_x, \quad (8)$$

де U_x - показ вольтметра, В;

I_x - струм споживача, значення якого згідно з векторною діаграмою:

$$I_x = \sqrt{(I \sin \varphi)^2 + (I \cos \varphi - I_V - I_{UW})^2}, \quad (9)$$

де $I = I_A$ - показ амперметра, А; $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$;

$\cos \varphi = P_w / U_x I$ - косинус кута зсуву між струмом I та напругою U_x ;

$I_V = U_x / R_V$ - струм, споживаний вольтметром;

$I_{UW} = U_x / R_{UW}$ - струм споживаний колом напруги ватметра.

Значення **коефіцієнта потужності споживача**:

$$\cos \varphi_w = \frac{P_w}{U_x I_x}, \quad (10)$$

а значення **реактивної потужності**:

$$Q_x = U_x I_x \sin \varphi_w. \quad (11)$$

Вимірювання активної потужності споживачів в трифазних колах.

Для вимірювання активної потужності в трифазних колах змінного струму застосовується метод одного, двох і трьох ватметрів.

Лабораторна робота №3
РОЗШИРЕННЯ МЕЖ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ
ПРИЛАДІВ

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При виборі приладу вимірювання, поряд з іншими класифікаційними ознаками, перш за все орієнтуються на його границі вимірювання: I_N - струмових кіл, U_N - кіл напруги. При чому, якщо в приладі є обидва кола (багатограничні прилади – ватметри, фазометри, тощо) то границі I_N і U_N вибираються незалежно.

В аналогових однограничних приладах (з одним вимірювальним колом) **ціна поділки шкали** (стала приладу) визначається:

$$C_{П,к} = \frac{П_{N,к}}{N}, \quad (1)$$

де N – загальна кількість поділок;

$П_{N,к}$ - максимальний показ приладу для вибраної $к$ -ї границі вимірювання.

Величина обернена до $C_{П,к}$ називається **чутливістю приладу** – це відношення приросту переміщення покажчика приладу до приросту вимірюваної величини $S = \Delta\alpha / \Delta x$. Якщо шкала приладу рівномірна, то чутливість стала $S = \alpha/x$:

$$S_{П,к} = \frac{1}{C_{П,к}} = \frac{N}{П_{N,к}}. \quad (2)$$

В випадку наявності двох вимірювальних кіл, ціна поділки визначається з урахуванням вибраних границь кожного з них. Наприклад, у ватметрі при встановлених границях струму I_{NW} і напруги U_{NW} ціна поділки потужності:

$$C_w = \frac{U_{NW} \cdot I_{NW}}{N_w}. \quad (3)$$

Тоді значення вимірюваної величини, при відхиленні стрілки на $n_{П}$ поділок:

$$X_B = C_{П,к} \cdot n_{П} \quad (4)$$

Якщо необхідно використати прилади в колах з напругою і струмом, що перевищують відповідні границі I_N і U_N , то при складанні вимірювального кола використовують засоби для розширення границь вимірювання пристроїв.

Для розширення меж вимірювання по струму застосовуються шунти.

Шунт є каліброваним малоомним чотириклемним резистором і виступає простим вимірювальним перетворювачем струму в напругу. Два вхідні затискачі, до яких підводиться струм I , називаються струмовими, а два вихідних затискачі, з яких знімається напруга U , називаються потенціальними (рис. 3.1,а). До потенціальних затискачів приєднують вимірювальний механізм приладу. При цьому велику частину вимірюваного струму пропускають через шунт, а меншу — через вимірювальний механізм. Шунти мають невеликий опір і застосовуються, в основному, в колах постійного струму з магнітоелектричними вимірювальними механізмами (вольтметрами чи мілівольтметрами проградуйованими в амперах).

$$P_w = C_w \cdot n_w, \quad (3)$$

де n_w - відлік по шкалі ватметра; C_w - стала ватметра, Вт:

$$C_w = \frac{P_{NW}}{N_{w,max}} = \frac{U_{NW} I_{NW} \cos \varphi_{NW}}{N_{w,max}}, \quad (4)$$

де U_{NW}, I_{NW} - границі вимірювання ватметра за напругою і струмом; $\cos \varphi_{NW}$ - номінальний коефіцієнт потужності ватметра; $N_{w,max}$ - максимальний відлік по шкалі ватметра.

Крім потужності досліджуваного об'єкта P_x , ватметр вимірює також потужність, яку споживають самі засоби вимірювання, що приводить до виникнення методичної похибки. Тому існують 2 схеми вимірювання потужності: за схемою правильного вимірювання напруги (рис.6.2, а) або правильного вимірювання струму (рис.6.2, б).

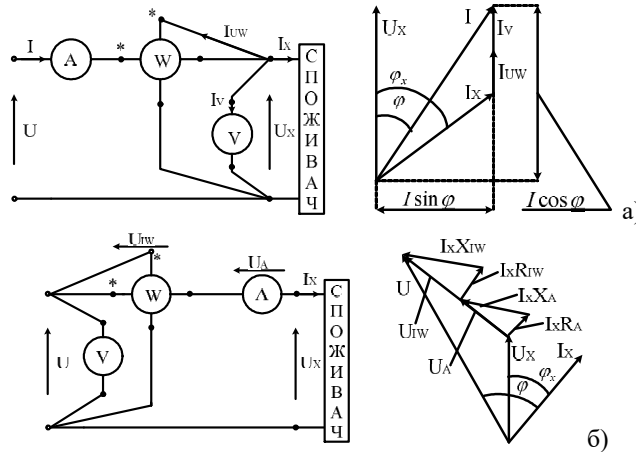


Рис. 6.2. Схеми вимірювання потужності однофазного споживача змінного струму за допомогою ватметра

Очевидно, що необхідно вибрати ту схему вимірювання, яка дає меншу методичну похибку. Значення відносної методичної похибки схем правильного вимірювання напруги і струму відповідно визначаються за формулами:

$$\delta_M' = \frac{P_{UW} + P_V}{P_x} \cdot 100\%; \quad \delta_M'' = \frac{P_{IW} + P_A}{P_x} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де P_x - розрахункова потужність споживача;

$P_{UW} = U_x^2 / R_{UW}$ - потужність, споживана напруговою обмоткою ватметра;

$P_V = U_x^2 / R_V$ - потужність, споживана вольтметром;

$P_{IW} = I_x^2 \cdot R_{IW}$ - потужність, споживана струмовою обмоткою ватметра;

$P_A = I_x^2 \cdot R_A$ - потужність, споживана амперметром;

$R_{UW} = U_{NW} / I_{UW}$ - опір напругової обмотки ватметра;

Лабораторна робота №6
ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ В КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Непрямий метод вимірювання потужності. Потужність споживачів в колах постійного струму визначається за формулою $P = IU$, тобто її можна виміряти за допомогою амперметра, вольтметра. Схеми для вимірювання потужності непрямим методом показані на рис. 6.1.

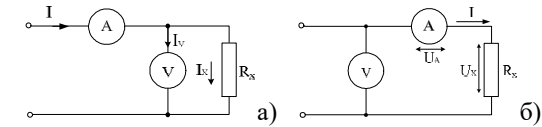


Рис. 6.1. Схеми для вимірювання потужності амперметром і вольтметром:
а) правильного вимірювання напруги; б) правильного вимірювання струму

Аналогічно як при вимірюванні опору при таких вимірюваннях крім основної похибки приладу з'являється методична похибка вимірювання потужності:

для схеми а): $\Delta'_P = UI_R - U(I_V + I_R) = -\frac{U^2}{R_V}$, то $\delta'_M = \frac{|\Delta'_P|}{P} \cdot 100\% = \frac{R}{R_V} \cdot 100\%$; (1)

для схеми б): $\Delta''_P = U_R I - (U_A + U_R) I = -I^2 R_A$, то $\delta''_M = \frac{|\Delta''_P|}{P} \cdot 100\% = \frac{R_A}{R} \cdot 100\%$, (2)

де R_A R_V - внутрішній опір амперметра і вольтметра.

Для отримання точнішого результату вибирають схему з меншим значенням відносної методичної похибки.

В однофазних колах змінного струму крім струму і напруги необхідно вимірювати кут зсуву фаз між ними, відповідно до формули: $P = IU \cos \phi$. Проте на практиці вимірювання активної потужності в колах змінного струму здійснюється **прямим методом** за допомогою однофазних ватметрів (рис. 6.2.).

Наявність в колі вольтметра й амперметра дозволяє не тільки уникнути перевантаження кіл ватметра, а й визначити ряд інших параметрів споживача, таких як повна потужність, коефіцієнт потужності, еквівалентний опір тощо. Знаючи розрахункові (або орієнтовні для даного кола) значення напруги U_X , струму I_X та коефіцієнта потужності $\cos \phi_X$, можна переходити до вибору вимірювальних приладів, аналогічно як і при вимірюванні опору. Для розширення меж вимірювання по струму і напрузі використовують ВТС і ВТН.

Якщо вимірювання активної потужності споживачів проводиться на змінному струмові, то доцільно використовувати амперметри і вольтметри електромагнітної системи, оскільки порівняно з приладами електродинамічної системи вони мають менше власне споживання енергії. Ватметр вибирають електродинамічної або феродинамічної системи з $\cos \phi_w = 1,0$.

Активна потужність виміряна ватметром:

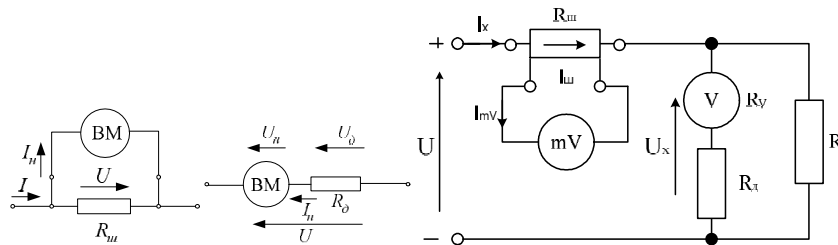


Рис.3.1. Розширення меж вимірювання пристроїв:
а) шунтом; б) додатковим резистором; в) схема вимірювання опору

Шунт характеризується номінальними значеннями вхідного струму $I_{НОМ}$ і вихідної напруги $U_{НОМ}$. Їх відношення визначає номінальний опір шунта $R_{Ш} = U_{НОМ} / I_{НОМ}$. **Вимірюваний струм I** визначається через значення струму, що проходить через вимірювальний механізм I_B (показ приладу) і опір механізму R_{BM} :

$$I = I_B + I_{Ш} = I_B \left(1 + \frac{R_{BM}}{R_{Ш}}\right) = I_B \frac{R_{Ш} + R_{BM}}{R_{Ш}}. \quad (5)$$

Якщо необхідно зменшити струм I_B в n разів відносно I , то **опір шунта**:

$$R_{Ш} = R_{BM} / (n - 1), \quad (6)$$

де $n = I / I_B$ — коефіцієнт шунтування приладів, для зручності n вибирається цілим числом $n=2; 5; 10$ і т. д.

Враховуючи клас точності приладів, граничне значення похибки вимірювання буде складатись з похибки вимірюваного механізму, похибки шунта і методичної:

$$\delta I_X = \pm (\delta_{BM} + \delta_{R_{Ш}} + \delta'_M), \quad (7)$$

де $\delta'_M = \frac{R_{Ш} \cdot R_{BM}}{R_{Ш} \cdot (R + R_{BM}) + R_{BM} \cdot R}$ - методична похибка від впливу опору ВМ.

Застосування шунтів з вимірювальними механізмами інших систем, окрім магнітоелектричної, нерационально, оскільки інші вимірювальні механізми споживають велику потужність, що приводить до істотного збільшення опору шунтів і, отже, до збільшення їх розмірів і споживаної потужності.

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

Додаткові резистори служать для розширення меж вимірювання по напрузі вольтметрів різних систем (за винятком електростатичної і електронної) та приладів, що мають паралельні вимірювальні кола і застосовуються в колах постійного і змінного струму. Сюди відносяться, ватметри, лічильники енергії, фазометри і т.д.

Додаткові резистори є вимірювальними перетворювачами напруги в струм, і включають їх послідовно з вимірювальним механізмом. Струм I_B в колі, що складається з вимірювального механізму з опором R_V і додаткового резистора з опором R_D , складе: $I_B = U / (R_V + R_D)$, де U — вимірювана напруга.

задану точність омметр з номіналом 300 Ом і класом точності 1,5?

4. Для вимірювання опору непрямим методом використали два прилади: амперметр E514/2; класу точності $\gamma_A = 0,5$; $I_{NA} = 5A$; $R_A = 0,005$ Ом і вольтметр E515/3; класу точності $\gamma_V = 0,5$; $U_{NV} = 300V$; $R_V = 40$ кОм. Покази приладів $U = 270V$, $I = 3,7A$. Вибрати схему вимірювання, що забезпечувала б найменшу методичну похибку та визначити в яких межах знаходиться дійсне значення вимірюваного опору R_x .

5. В досліджуваному колі постійного струму значення струму і напруги складають відповідно $I = 5A$, $U = 115$ В. Вибрати вимірювальні прилади і схему вимірювання активного опору з мінімальним значенням методичної похибки. Визначити загальну похибку вимірювання опору.

6. Значення струму і напруги короткого замикання однофазного трансформатора дорівнюють $I_K = 67A$, $U_K = 380$. Вибрати прилади для вимірювання активного опору первинної обмотки трансформатора непрямим методом, визначити ціну поділки амперметра і вольтметра та похибку вимірювання. Намалювати схему вимірювання.

7. Одинарний міст постійного струму (рис.5.2.) знаходиться в стані рівноваги за таких значень опорів резисторів: $R_2 = 100$ Ом; $R_3 = 10$ Ом; $R_4 = 58$ Ом. Визначити величину вимірювального опору R_x і границі його дійсного значення, якщо клас точності моста 0,2 а межа вимірювання – $R_N = 100$ Ом.

8. Підберіть значення плечей одинарного моста постійного струму для перевірки опорів $R_x = 23$ Ом, 150 Ом, 8кОм.

9. Розрахувати напругу живлення моста постійного струму і вибрати гальванометр для перевірки опорів з задачі 5. Гальванометр вибираємо з додатку 3.

10. За допомогою моста постійного струму визначити місце короткого замикання у кабельній лінії - I_x (рис 5.3,б). Опір резисторів у плечах моста під час його зрівноваження становить: $R_2 = 1000$ Ом; $R_3 = 10$ Ом; $R_4 = 230$ Ом. Опір 1 м кабелю становить 0,005 Ом.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Опишіть прямий і непрямий методи вимірювання опору.
2. Як здійснюється вибір приладів при непрямому вимірюванні опору?
3. Схеми вимірювання опору методом амперметра і вольтметра.
4. Які похибки виникають при вимірюванні опору методом амперметра і вольтметра?
5. Як здійснюється вимірювання опору за допомогою мостів постійного струму?
6. Умова рівноваги моста постійного струму?
7. Від чого залежить точність вимірювання опору мостом постійного струму?

Якщо вольтметр має межу вимірювання $U_{НОМ}$ і опір вимірювального механізму R_V і за допомогою додаткового резистора R_D треба розширити межу вимірювання в m разів, то, враховуючи постійність струму I_B , що протікає через вимірювальний механізм вольтметра, можна записати:

$$\frac{U_{НОМ}}{R_V} = \frac{mU_{НОМ}}{R_V + R_D}, \text{ тоді опір } R_D: R_D = R_V(m-1). \quad (8)$$

$$\text{Гранична похибка вимірювання: } \delta_{U_X} = \pm(\delta_V + \delta_{R_D} + \delta_M''), \quad (9)$$

де $\delta_M'' = R/[R_D + R_V + R]$ - методична похибка від впливу опору вольтметра.

Оскільки $\delta_M' \ll \delta_{BM}$ і $\delta_M'' \ll \delta_V$, то цими похибками можна знехтувати.

Додаткові резистори застосовуються для перетворення напруги до 30 кВ.

Вимірювальні трансформатори поділяються на трансформатори струму (ВТС) і напруги (ВТН) і призначаються для перетворення великих змінних струмів і напруг у відносно малі струми і напруги переважно у колах змінного струму.

За схемами включення у вимірюване коло і умовою роботи трансформатори струму і напруги відрізняються один від одного.

Вимірювальні трансформатори складаються з двох ізольованих одна від одної обмоток, розміщених на магнітопроводі: первинної з числом витків w_1 і вторинної з числом витків w_2 . Первинна обмотка трансформаторів струму, виводи якої позначаються буквами Л1 Л2 (лінія), включається у вимірюване коло послідовно (рис 3.2,а). До вторинної обмотки В1, В2 (вимірювання), послідовно підключають амперметри, послідовні обмотки ватметрів, лічильників та інших приладів. Трансформатори струму працюють в режимі, близькому до режиму короткого замикання, так як у вторинну обмотку вмикаються прилади з малим внутрішнім опором. При значній потужності кола первинного струму розмикання вторинного кола трансформатора струму викликає значне збільшення магнітного потоку у вторинній обмотці та збільшення ЕРС, що може привести до аварійного стану: пробоею ізоляції і небезпеки для обслуговуючого персоналу.

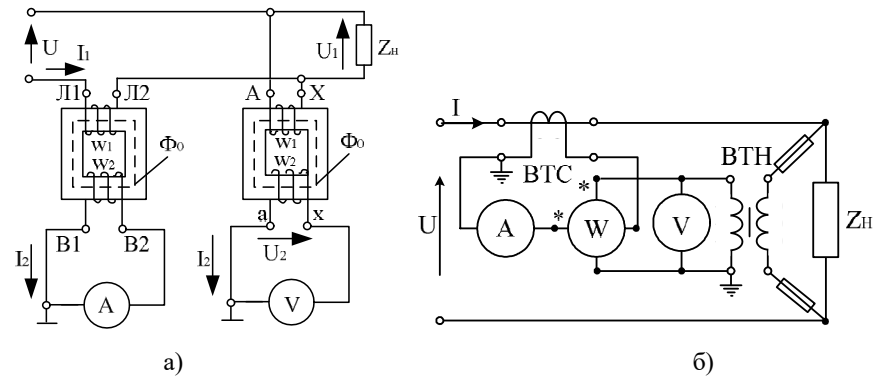


Рис. 3.2 а) розширення меж вимірювання приладів за допомогою трансформаторів струму і напруги; б) схема вимірювання потужності

Первинна обмотка трансформатора напруги, виводи якої позначаються буквами А, Х (початок — кінець), вмикається у вимірюване коло паралельно, а до виводів вторинної обмотки, що позначаються відповідно а, х, підключають вольтметри, паралельні ланцюги ватметрів, лічильників тощо.

При вимірюванні у високовольтних колах трансформатори забезпечують безпеку обслуговування приладів, приєднаних до вторинних обмоток за рахунок електричної ізоляції (гальванічного розділення) первинної і вторинної обмоток і заземлення металевого корпусу та вторинної обмотки.

Завдяки трансформаторам у високовольтних колах, по яких можуть протікати великі струми, можна застосовувати прилади з невеликими стандартними номінальними значеннями струму і напруги (наприклад, 5 А і 100 В).

Для ВТС вторинний номінальний струм $I_{2ном}$ може бути 1; 2; 2,5; 5 А при значеннях первинного вимірюваного струму $I_{1ном}$ в межах від 0,8 до 40 000 А.

У ВТН первинна напруга U_1 більша вторинної U_2 , тому у них $w_1 > w_2$. Вторинна номінальна напруга $U_{2ном}$ в стаціонарних трансформаторів складає 100 і $100/\sqrt{3}$ В при первинній номінальній напрузі $U_{1ном}$ до $750/\sqrt{3}$ В.

За показами приладів, включених у вторинні обмотки, можна визначити значення вимірюваних величин. Для цього їх покази треба помножити на коефіцієнти трансформації K_i (для ВТС) і K_u (для ВТН):

$$K_i = I_1/I_2, \quad K_u = U_1/U_2. \quad (10)$$

Дійсні коефіцієнти трансформації зазвичай невідомі, оскільки вони залежать від режиму роботи трансформатора, тому покази приладу множать не на дійсні, а на номінальні коефіцієнти трансформації $K_{iном}$ і $K_{uном}$. Вони вказані на щитку трансформатора у вигляді дробів, чисельник - номінальне значення первинної, а знаменник — вторинної величини:

$$I_1 = I_2 \cdot K_{iном}, \quad U_1 = U_2 \cdot K_{uном}. \quad (11)$$

МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ

Приклад 3.1. Розрахувати опір шунта, який застосовується для розширення границі вимірювання струму до 20 А, якщо внутрішній опір вимірювального механізму (міліамперметра) $R_{mA} = 250$ Ом, клас точності 1,0, межа вимірювання $I_{NA} = 250$ mA, кількість поділок шкали $N = 100$. Обчислити відносну похибку вимірювання, якщо стрілка відхилилась на 70 поділок.

Розв'язання.

Вимірювальний струм складається з суми струмів, що проходять через шунт і вимірювальний механізм:

$$I_x = I_{ш} + I_{mA} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} + \frac{U_{ш}}{R_{mA}} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} \cdot \left(1 + \frac{R_{ш}}{R_{mA}}\right) = I_{ш} \cdot \frac{R_{mA} + R_{ш}}{R_{mA}}.$$

Коефіцієнт шунтування для заданих границь вимірювання струму:

$$n = \frac{I'_{NA}}{I_{NA}} = \frac{20}{250 \cdot 10^{-3}} = 800.$$

Визначимо величину струму і напруги в колі за показами приладів:

$$I_A = C_A \cdot n_A = n_A \cdot I_{NA} / N_{max} = 70 \cdot 150 \cdot 10^{-3} / 150 = 0,07 \text{ А};$$

$$U_V = C_V \cdot n_V = n_V \cdot U_{NV} / N_{max} = 115 \cdot 150 / 100 = 172,5 \text{ В}.$$

Тоді струм в колі:

$$I = I_B \cdot (R_{ш} + R_A) / R_{ш} = 0,07 \cdot (0,533 + 0,06) / 0,06 = 0,69 \text{ А},$$

де опір амперметра: $R_A = U_A / I_{NA} = 80 \cdot 10^{-3} / 150 \cdot 10^{-3} = 0,533$ Ом.

Значення опору за показами приладів:

$$R_x = U / I = 172,5 / 0,69 = 250 \text{ Ом}.$$

Основні похибки вимірювальних приладів:

$$\Delta_A = \frac{\gamma_A \cdot I_{NA}}{100\%} = \frac{0,2 \cdot 150 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ А}; \quad \delta_A = \frac{\Delta_A}{I_A} \cdot 100\% = \frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{0,07} \cdot 100\% = 0,43\% ;$$

$$\Delta_V = \frac{\gamma_V \cdot U_{NV}}{100\%} = \frac{0,2 \cdot 150}{100\%} = 0,3 \text{ В}; \quad \delta_V = \frac{\Delta_V}{U} \cdot 100\% = \frac{0,3}{172,5} \cdot 100\% = 0,17\% ;$$

$$\Delta_{ш} = \frac{\gamma_{ш} \cdot R_{ш}}{100\%} = \frac{0,1 \cdot 0,06}{100\%} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}; \quad \delta_{ш} = \frac{\Delta_{ш}}{R_{ш}} \cdot 100\% = \frac{0,06 \cdot 10^{-3}}{0,06} \cdot 100\% = 0,1\% .$$

Методичні похибки схеми вимірювання опору:

$$\Delta_M = \frac{R^2}{R_V + R} = \frac{250^2}{150000 + 250} = 0,42 \text{ Ом}; \quad \delta_M = \frac{\Delta_M}{R} \cdot 100\% = \frac{0,42}{250} \cdot 100\% = 0,17\% ,$$

де опір вольтметра: $R_V = U_{NV} / I_V = 150 / 1 \cdot 10^{-3} = 150 \cdot 10^3$ Ом.

Сумарна похибка вимірювання:

$$\delta = \delta_A + \delta_V + \delta_{ш} + \delta_M = 0,87\% , \quad \Delta = \delta \cdot R / 100\% = 0,87 \cdot 250 / 100\% = 2,175 \text{ Ом}.$$

Дійсне значення опору: $R_D = R \pm \Delta = 250 \pm 2,175$ Ом.

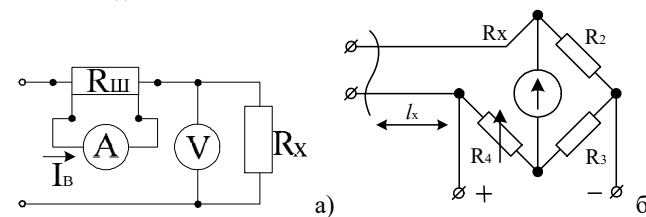


Рис.5.3. а) схема до прикладу 5.2; б) схема до задачі 10.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

- Для вимірювання опору використали омметр класу точності $\textcircled{0,2}$. Записати границі дійсного значення опору, якщо показ приладу 12 Ом.
- Для вимірювання опору використали вольтметр на 150 В, амперметр на 5 А зі шкалами на 100 поділок. Накресліть схему і визначте шуканий опір, якщо стрілка амперметра показує 80 поділок, вольтметра – 120 поділок.
- Необхідно виміряти опір резистора 200 Ом з точністю 2%. Чи забезпечить

$$R_{MT} = \frac{(R_X + R_{ПОР}) \cdot (R_2 + R_3)}{R_X + R_{ПОР} + R_2 + R_3}. \quad (9)$$

З виразу для потужності, що виділяється в колі гальванометра, можна розрахувати необхідну сталу гальванометра за струмом за формулою:

$$C_I = \frac{\varepsilon_O}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{P_{НАВ}}{R_{MT}} \cdot \frac{R_{НАЙМ}}{\Sigma R} \cdot \frac{s}{(1+s)^2}}. \quad (10)$$

При попередньому розрахунку C_I приймають, що відхилення показчика гальванометра $\alpha = 1$, а опір гальванометра дорівнює опорі моста відносно затискачів гальванометра, тобто $R_0 = R_{M0}$, тоді $s = 1$, а $s/(1+s)^2 = 1/4$.

Вибирається гальванометр стала якого за струмом C_I дорівнює або є дещо меншою від розрахованої величини.

Тоді відхилення стрілки гальванометра α :

$$\alpha = \frac{\varepsilon_O}{C_I} \cdot \sqrt{\frac{P_{НАВ}}{R_0} \cdot \frac{R_{НАЙМ}}{\Sigma R} \cdot \frac{R_0 / R_{M0}}{(1 + R_0 / R_{M0})^2}} \quad (11)$$

Якщо відхилення не менше $0,5 \div 1$ под., то чутливість вибраного гальванометра достатня і його можна використовувати у мостовій схемі для перевірки опорі R_X . Якщо α перевищує 10 поділок, то слід вибрати менш чутливий гальванометр або зменшити напругу джерела живлення.

МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ

Приклад 5.1. Одинарний міст постійного струму (рис.5.2.) знаходиться в стані рівноваги за таких значень опорів резисторів: $R_2 = 1000$ Ом; $R_3 = 100$ Ом; $R_4 = 136$ Ом. Визначити величину вимірювального опорі R_X і відносну похибку вимірювання, якщо клас точності моста 1,0, а межа вимірювання – $R_N = 100$ Ом.

Розв'язання.

За умовою рівноваги моста знаходимо величину вимірюваного опорі:

$$R_X = \frac{R_4 \cdot R_3}{R_2} = \frac{136 \cdot 100}{1000} = 13,6 \text{ Ом.}$$

Абсолютна і відносна похибки вимірювання:

$$\Delta R = \frac{K \cdot R_N}{100\%} = \frac{1,0 \cdot 100}{100} = 1,0 \text{ Ом; } \delta = \frac{\Delta R}{R_X} \cdot 100\% = \frac{1}{13,6} \cdot 100\% = 7,4\% .$$

Приклад 5.2. Для вимірювання опорі непрямым методом використали амперметр М1104: $\gamma_A = 0,2$; $I_{NA} = 150$ мА; $U_A = 80$ мВ; $N_{max} = 150$ под., і вольтметр М1106: $\gamma_V = 0,2$; $U_{NV} = 150$ В; $I_V = 1,0$ мА; $N_{max} = 100$ под. Для розширення межі вимірювання по струму використали шунт $R_{Ш} = 0,06$ Ом; $\gamma_{ш} = 0,1$ (схема рис.5.3,а). Покази приладів складають $n_A = 70$ под., $n_V = 115$ под. Визначити величину вимірюваного опорі і записати межі його дійсного значення.

Розв'язання.

Тоді опір шунта:

$$R_{Ш} = \frac{R_{mA}}{n-1} = \frac{250}{800-1} = 0,313 \text{ Ом,}$$

Ціна поділки амперметра і його показ:

$$C_{АШ} = \frac{I'_{NA}}{N_{max}} = \frac{20}{100} = 0,2 \text{ А/под, } I_X = C_{АШ} \cdot \alpha = 0,2 \cdot 70 = 14 \text{ А}$$

Основна абсолютна і відносна похибки вимірювання:

$$\Delta = \frac{K \cdot I'_{NA}}{100\%} = \frac{1 \cdot 20}{100\%} = 0,2 \text{ А, } \delta = \frac{\Delta}{I_X} \cdot 100\% = \frac{0,2}{14} \cdot 100\% = 1,43\% .$$

Приклад 3.2. До мережі змінного струму через трансформатор напруги з коефіцієнтом трансформації $k_U = 1000/100$ і трансформатор струму з коефіцієнтом трансформації $k_I = 100/5$ під'єднано відповідно вольтметр і амперметр. Обчислити значення вимірюваної напруги та струму, якщо стрілка вольтметра ($U_{NV} = 100$ В, $N_{max} = 100$) відхилилась на 70 поділок, а стрілка амперметра ($I_{NA} = 5$ А, $N_{max} = 100$) – на 60 поділок.

Розв'язання.

Ціна поділки амперметра і вольтметра:

$$C_A = \frac{I_{NA}}{N_{max}} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ А/под; } C_V = \frac{U_{NV}}{N_{max}} = \frac{100}{100} = 1 \text{ В/под.}$$

Коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів:

$$k_I = 100/5 = 20; k_U = 1000/100 = 10.$$

Тоді значення вимірювального струму і напруги:

$$I = C_A \cdot \alpha \cdot k_I = 0,05 \cdot 60 \cdot 20 = 60 \text{ А; } U = C_V \cdot \alpha \cdot k_U = 1 \cdot 70 \cdot 10 = 700 \text{ В.}$$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Амперметр має границю вимірювання $I_{NA} = 2,5$ А, внутрішній опір вимірювального механізму $R_A = 2$ Ом, кількість поділок шкали $N_A = 100$. Визначити опір шунта $R_{Ш}$, необхідного для розширення границі вимірювального приладу до $I = I_B = 15; 50; 150$ А, значення сталої шкали приладу $C_{АШ}$, а також граничні похибки вимірювання струму, якщо відомо класи точності амперметра і шунта $\gamma_A = 1,0$, $\gamma_{ш} = 0,5$. Намалювати схему вмикання шунта.

2. Вольтметр має границю вимірювання $U_{NV} = 200$ В, внутрішній опір вимірювального механізму $R_V = 2$ кОм, кількість поділок шкали $N_V = 150$. Визначити опір додаткового резистора $R_{Д}$, необхідного для розширення границі вимірювального приладу до $U = U_B = 1; 50; 150$ кВ, значення сталої шкали приладу C_{VD} , а також граничні похибки вимірювання напруги, якщо відомо класи точності вольтметра і резистора $\gamma_V = 0,5$, $\gamma_D = 0,2$. Намалювати схему вмикання додаткового резистора.

3. До магнітоелектричного міліамперметра на 75 мА з внутрішнім опором 10 Ом підключений шунт, опір якого дорівнює 0,53 Ом. Як зміниться чутливість приладу за

струмом?

4. Магнітоелектричний вольтметр на 75 мВ зі шкалою 150 поділок має опір 50 Ом. Чому дорівнюють його стала і чутливість за струмом і напругою, потужність власного споживання? Як розширити межу вимірювання цього приладу до 3 В?

5. Підберіть шунти до магнітоелектричного приладу зі шкалою на 5 мА і опором 10 Ом таким чином, щоб цим приладом можна було вимірювати струми 1, 3, 5 А. Наведіть схему.

6. На розподільному щитку однофазного струму встановлений вольтметр на 150 В, амперметр на 5 А, зі шкалами на 150 і 100 поділок і ватметр на 150 В і 5 А зі шкалою на 150 поділок. Амперметр і ватметр включені через трансформатор струму 50/5. Накресліть схему і визначте первинний струм, напругу і потужність, якщо стрілка амперметра показує 80 поділок, вольтметра – 120 поділок, ватметра – 50 поділок.

7. До мережі однофазного струму через трансформатори струму 100/5 і напруги 30000/100 ввімкнений електродинамічний ватметр на напругу 120 В і струм 5 А зі шкалою 150 поділок. Наведіть схему вмикання приладів і визначте потужність мережі, якщо показ ватметра – 85 поділок.

8. Магнітоелектричний вимірювач з опором 0,3 Ом має шкалу на 100 поділок і чутливість за струмом 0,05 1/мА. Визначте постійну цього приладу і нову межу вимірювання при підключенні шунта з опором 0,015 Ом. Наведіть схему.

9. Міліамперметр на 200 мА має опір 3 Ом, чутливість за струмом 0,5 1/мА. Визначте число поділок всій шкали і струм в колі, якщо стрілка приладу відхилилась на 25 поділок. Як зробити межу виміру цього приладу рівною 30 В?

10. До мережі однофазного струму через трансформатори струму 200/5 і напруги 6000/100 ввімкнені амперметр, вольтметр і ватметр. Визначте покази всіх приладів, якщо відомо, що струм в колі 168 А, напруга – 3300 В і $\cos \phi = 0,74$.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Як визначається ціна поділки одно- і багатограничних приладів?
2. Що таке чутливість вимірювального приладу?
3. Як розширити границю вимірювання приладу по струму?
4. Як розширити границю вимірювання приладу по напрузі?
5. Як розраховується опір шунта для розширення меж вимірювання по струму і якою буде ціна поділки вимірювального приладу?
6. Як розраховується додатковий опір для розширення меж вимірювання по напрузі і якою буде ціна поділки вимірювального приладу?
7. Як вмикаються в вимірювальне коло вимірювальні трансформатори струму і напруги?
8. Що таке номінальний коефіцієнт трансформації трансформатора?
9. Як визначити дійсне значення струму і напруги по показах приладів, ввімкнених в коло через ВТС і ВТН?

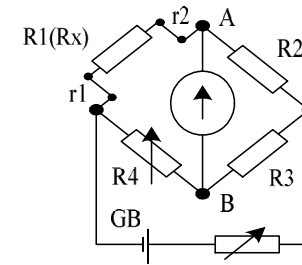


Рис.5.2 Схема одинарного моста постійного струму

Опір плеча порівняння $R_{нмт}$ і опорів плеч відношення R_2 і R_3 моста можна визначити, виходячи із умови рівноваги моста (5) з таким розрахунком, щоб опори плеч моста були по можливості однакові за своїм значенням, тобто щоб відношення $R_{найм} / \Sigma R$ було максимальним (в границі воно може дорівнювати 1/4);

$R_{найм}$ - це найменший із чотирьох опорів плеч моста ($R_x, R_{нмт}, R_2$ або R_3);
 $\Sigma R = R_x + R_{нмт} + R_2 + R_3$ - сума всіх опорів.

Точність вимірювання мостом постійного струму визначається точністю номіналів еталонних опорів $R1, R2, R3$ і точністю визначення моменту балансу моста, що залежить від чутливості гальванометра і величини ЕРС джерела живлення.

Оптимальна величина U залежить від опору досліджуваного резистора R_x . Щоб розрахувати напругу джерела живлення, попередньо треба визначити значення струму найбільш навантаженого плеча моста:

$$I_{HAB} = \sqrt{\frac{P_{HAB}}{R_{HAB}}} = \sqrt{\frac{P_{MH}}{R_{HAB}}}, \quad (7)$$

де R_{HAB} - опір найбільш навантаженого плеча (найбільш навантаженим завжди є плече, ввімкнене в коло послідовно з найбільш низькоомним плечем моста).

$P_{HAB} = P_{MH}$, Вт - потужність, що розсіюється в найбільш навантаженому плечі моста. Значення напруги U джерела живлення визначають як добуток I_{HAB} і суми опорів R_{HAB} та послідовного з ним плеча.

Вибір оптимальних параметрів гальванометра раціонально проводити по максимуму потужності, що виділяється в колі гальванометра при певному значенні

$$\epsilon_0 : P_0 = I_x^2 \cdot R_x = (C_I \cdot \alpha)^2 \cdot R_0 = \epsilon_0^2 \cdot P_{HAB} \cdot \frac{R_{HAB}}{\Sigma R} \cdot \frac{s}{(1+s)^2}, \quad (8)$$

де C_I - постійна гальванометра по струму, А/под;

α - відхилення показника гальванометра (стрілки), под;

$s = R_0 / R_{M0}$ - відношення опору гальванометра R_0 до вихідного опору моста R_{M0} відносно затискачів гальванометра.

Для одинарного моста R_{M0} дорівнює:

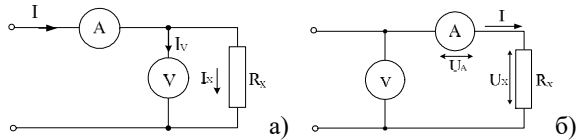


Рис. 5.1. Схеми для вимірювання опорів амперметром і вольтметром:
а) правильного вимірювання напруги; б) правильного вимірювання струму

Лабораторна робота №4 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗМІННОЇ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛОГОВИХ ВОЛЬТМЕТРІВ

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

В практиці електровимірювань значна увага приділяється вимірюванню значень напруги, за допомогою яких характеризують основні режими роботи пристроїв, оскільки паралельний спосіб вмикання вольтметра (не розриваючи вимірювальне коло) не порушує електричних процесів в ньому. Змінна напруга промислової частоти має синусоїдальну форму $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, а її миттєве значення характеризується параметрами:

Пікове значення U_m (для гармонійного коливання – амплітудне) – це найбільше миттєве значення змінної складової напруги $u(t)$ за час вимірювання t (або за період T). Амплітудне значення сигналу є найменш інформативним параметром, тому для оцінки дії струму і напруги використовують параметри, що дозволяють порівняти їх з сигналом постійного струму.

Середнє значення за час вимірювання (або за період) – це постійна складова напруги $u(t)$. Для сигналу, форма якого симетрична відносно осі часу (наприклад синусоїдальний сигнал) дорівнює 0.

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (1)$$

Средньовипрямлене значення СВЗ – середнє абсолютного значення напруги:

$$U_{cv} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt. \quad (2)$$

Средньоквадратичне значення СКЗ – це додатній корінь квадратний з середнього значення квадрата напруги:

$$U_{ck} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (3)$$

СКЗ ще називають **діючим або ефективним** - це таке значення постійного струму чи напруги, при якому за період часу T на опорі виділяється та ж сама кількість енергії, що й при змінному сигналі. Для синусоїдних величин струму, напруги і ЕРС діючі значення дорівнюють:

$$I = I_m / \sqrt{2}; \quad U = U_m / \sqrt{2}; \quad E = E_m / \sqrt{2} \quad (4)$$

Сукупність значень сигналу змінної напруги є інтегральною характеристикою його форми. У практиці вимірювань для оцінок використовують наступні коефіцієнти:

$$- \text{ форми} \quad K\phi = U_{ck} / U_{cv}, \quad (5)$$

$$- \text{ амплітуди} \quad Ka = U_m / U_{ck}, \quad (6)$$

$$- \text{ усереднювання} \quad Ky = K\phi \cdot Ka = U_m / U_{cv}. \quad (7)$$

Для того, щоб розрахувати ці коефіцієнти, необхідно:

- записати математичну модель досліджуваної напруги $u(t)$;

Величина **абсолютної похибки** в першому і другому випадках:

$$\Delta R_{x1} = R'_x - R_x = R_x^2 / (R_x + R_v), \quad \Delta R_{x2} = R'_x - R_x = R_A. \quad (2)$$

Відносні похибки при цьому відповідно рівні:

$$\delta_{1M} = \frac{R_x}{R_x + R_v} \cdot 100\%, \quad \delta_{2M} = \frac{R_A}{R_x} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Тому для отримання точнішого результату вимірювання слід вибирати схему з меншим значенням відносної методичної похибки.

Сумарна похибка вимірювання активного опору навантаження:

$$\delta_R = \delta_A + \delta_v + \delta_M, \quad (4)$$

де $\delta_A = \gamma_A \cdot I_{NA} / I_x$ - похибка амперметра;

$\delta_v = \gamma_v \cdot U_{NV} / U_x$ - похибка вольтметра.

2. Вимірювання опору навантаження мостовим методом.

Вимірювання мостовим методом засноване на використанні диференціального (різницевого) методу вимірювань (рис. 5.2).

Вимірюваний опір R_x вмикають в одне з плеч моста, діагоналі якого підключають до джерела живлення і нуль-індикатора (гальванометр, мікроамперметр з нулем посередині шкали). Плечі R_4 і R_3 виконують у вигляді магазинів опорів, за допомогою R_3 встановлюють ряд значень відношення $R_3/R_2 = n$ (звичайно кратне 10) а за допомогою підбору R_4 (його називають плечем порівняння) врівноважують міст.

$$\text{Умова рівноваги моста} (I_g=0 \text{ або } U_{AB}=0): \quad \frac{R_x}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (5)$$

тоді значення невідомого опору:

$$R_x = R1 = R4 \cdot R2 / R3 \quad (6)$$

Для вимірювання опорів класу точності 0,2 або 0,5 можна використати одинарний міст постійного струму типу Р39 з такими технічними даними:

- клас точності - $\epsilon_m = 0,05$;

- номінальна потужність розсіювання плеч моста: $P_{MH} = 0,05$ Вт;

- опір плеча порівняння:

$R_{пор} = R_4 = (k \times 1000; k \times 100; k \times 10; k \times 1,0; k \times 0,1; k \times 0,01)$ Ом, $k = 1..10$;

- опори плеч відношення: $R_2; R_3 : (10000; 10000; 1000; 100; 10)$ Ом.

- обчислити $U_{св}$ за формулою (3) і $U_{ск}$ за (4);
- підставити отримані значення в (5), (6), (7).

Приклади значень коефіцієнтів для різних форм сигналу наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Форма сигналу	Графік	Середнє U_0	Ка	Кф
Синусоїдальна		0	1,41	1,11
Пульсуєча (двонапівперіодний випрямляч)		$\frac{2}{\pi}$	1,41	1,11
Пульсуєча (однапівперіодний випрямляч)		$\frac{1}{\pi}$	2	1,57
Пилкоподібна		$\frac{U_{max}}{2}$	1,73	1,16
Трикутна (симетрична)		$\frac{U_{max}}{2}$	1,73	1,16
Прямокутна (меандр)		0	1	1
Прямокутні імпульси з тривалістю τ і періодом T		$\frac{U_{max}}{Q}$	\sqrt{Q}^*	\sqrt{Q}^*

* де $Q = T/\tau$ – скважинність сигналу.

Більшість вольтметрів змінної напруги розраховані на точне вимірювання лише одного параметра сигналу, тому важливою задачею є розрахунок основних параметрів для різних форм сигналів.

Для **вимірювання діючого значення** змінних струму і напруги промислової частоти найчастіше використовують електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні прилади без перетворення виду струму, на підвищених частотах - термоелектричні, електростатичні, випрямні і електронні прилади. В основному шкала таких приладів проградуєвана в діючих значеннях струму і напруги. Схеми вимірювання при безпосередньому ввімкненні амперметрів і вольтметрів аналогічні відповідним схемам при постійному струмі. Прилади прямого перетворення забезпечують вимірювання з похибкою не менше 0,1%. Для розширення границь вимірювання використовують ВТС і ВТН.

Для вимірювання інших параметрів кіл змінного струму використовують поєднання магнітоелектричних приладів з вимірювальними перетворювачами змінного струму і напруги в постійний – найчастіше це **термоелектричні та випрямні перетворювачі**. Випрямні перетворювачі побудовані на принципі випрямлення (детектування) змінного струму за допомогою нелінійних елементів – вакуумних і напівпровідникових діодів (детекторів). Термоелектричні вимірювальні перетворювачі використовують нагрів змінним струмом гарячого спаю термопари,

Лабораторна робота №5 ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для вимірювань активного опору елементів кіл постійного струму невисокої точності використовують прилади прямого перетворення в діапазоні $10^{-5}..10^9$ Ом - це магнітоелектричні омметри та мегомметри, при $10^{14}..10^{15}$ Ом – електронні мегомметри та тераомметри, похибка вимірювання складає 5-10%. Точнішими є опосередковані вимірювання за допомогою амперметра і вольтметра (особливо при вимірюванні опорів обмоток потужних електричних машин). Похибка методу залежить від похибок приладів і схеми їх вмикання. Для ще точніших вимірювань використовують мости, компенсатори постійного струму, цифрові прилади.

1. Вимірювання опору методом амперметра і вольтметра.

Метод застосовується для вимірювання малих і середніх опорів. При виборі вимірювальних приладів перевагу слід надавати приладам магнітоелектричної системи, через мале споживання енергії з кола і тому, що на їх точність не впливають зовнішні магнітні поля.

При цьому слід враховувати, що для вимірювання значень постійного струму I_x , що перевищують 10А доцільно скористатись шунтами або вимірювальними трансформаторами струму. Тоді струм первинної обмотки ВТС повинен дорівнювати або бути більшим від вимірюваного струму $I_{1Н} \geq I_x$, а струм його вторинної обмотки $I_{2Н}$ має дорівнювати межі вимірювання амперметра, тобто $I_{НА} = I_{2Н}$. У лабораторних ВТС ($\gamma_{ет.} = 0,05$) номінальні струми дорівнюють:

$I_{1Н} = 0,5; 1; 2; 2,5; 5; 7,5; 10; 15; 20; 25; 50; 75; 100; \dots 3000$ А.

$I_{2Н} = 5$ А (рідко 1 А).

Аналогічно, якщо величина вимірюваної напруги $U_x \leq 600$ В, то вольтметр вмикається безпосередньо в вимірювальне коло паралельно до навантаження. При цьому $U_{NV} \geq U_x$. При $600\text{В} < U_V < 1000\text{В}$, допускається вмикання вольтметра в вимірювальне коло послідовно з додатковим опором R_d . Якщо напруга $U_x > 1000$ В, то вольтметр вмикають в вимірювальне коло через вимірювальний трансформатор напруги (ВТН), причому: $U_{1Н} \geq U_x$, $U_{NV} = U_{2Н}$, де $U_{1Н}$ і $U_{2Н}$ - напруга первинної і вторинної обмоток ВТН.

Вибір схеми вимірювання опору.

Вимірювання опорів за методом амперметра та вольтметра можливе за однією з двох схем вмикання приладів (рис.5.1).

Якщо величину опору обчислити безпосередньо за показами приладів у вигляді:

$$R'_x = U/I, \quad (1)$$

то при цьому в обох випадках буде допущена **методична похибка**, величина якої залежить як від величини вимірюваного опору R_x , так і від опорів приладів R_A і R_V .

коефіцієнтом амплітуди рівним 1,73, і коефіцієнтом форми – 1,16.

3. Визначити середньопрямлене значення напруги, якщо показ пікового вольтметра, проградуйованого в пікових значеннях напруги, рівний 3,6 В, а сигнал характеризується наступними коефіцієнтами: амплітуди $Ka = 2$, форми $K\phi = 1,8$.

4. При вимірюванні напруги піковий вольтметр показав 30 В, вольтметр середньовипрямленого значення показав 15 В, вольтметр середньоквадратичного значення показав 20 В. Визначити коефіцієнт амплітуди, якщо всі три вольтметра проградуйовані в середньоквадратичних значеннях для гармонійного сигналу.

5. Вольтметр з перетворювачем середньовипрямлених значень, проградуйований в середньоквадратичних значеннях гармонійного сигналу, з відкритим входом показав 5 В. Визначити середньоквадратичне значення сигналу, якщо його коефіцієнти амплітуди і форми рівні 4. Записати результат вимірювання, якщо границя допустимої похибки вольтметра рівна 0,2В.

6. На вхід вольтметра з класом точності 0,5 з закритим входом поданий сигнал, аналітичний вираз якого $U(t) = 10 + 2\sin 628t$, В. Визначити показ та похибку вимірювання вольтметра з перетворювачем середньовипрямленого значення, проградуйованого в середньоквадратичних значеннях для гармонійного сигналу.

7. Для сигналу $U(t) = 10 + 2\sin 256t$, В визначити показ пікового вольтметра при відкритому і закритому входах, якщо він проградуйований в пікових значеннях.

8. Визначити пікове значення напруги сигналу пілкоподібної форми, якщо при його дослідженні вольтметр середньовипрямленого значення показав 1,41 В. Вольтметр проградуйований в середньоквадратичних значеннях сигналу.

9. Дана послідовність $U(t)$ прямокутних імпульсів з періодом, рівним 80 мкс, тривалістю – 20 мкс, піковим значенням – 10 В. Визначити середнє, середньовипрямлене і середньоквадратичне значення напруги сигналу.

10. Послідовність додатніх прямокутних імпульсів з частотою, рівною 12,5 кГц, і піковим значенням 30В, подана на піковий вольтметр з закритим входом, проградуйований в пікових значеннях. Визначте покази вольтметра, якщо тривалість імпульсів рівна 40 мкс.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Назвіть основні параметри змінних періодичних сигналів.
2. Як визначається і що характеризує діюче значення сигналу?
3. Як розраховуються коефіцієнти форми, амплітуди і усереднення для різних видів сигналів?
4. Які види приладів використовуються для вимірювання діючого значення напруги?
5. В чому особливість перетворювачів з відкритим і закритим входом?
6. Що таке коефіцієнт градування приладу?
7. Як визначити параметри сигналу за показами вольтметрів з піковим, середньо випрямленим, середньоквадратичним перетворювачами?
8. Чи впливає форма сигналу на покази електронних вольтметрів?
9. Чи можна виміряти діюче значення синусоїдної напруги магнітоелектричним вольтметром?

виникнення термо-ЕРС і постійного струму в колі термопари, що проходить через вимірювальних механізм основного пристрою. При використанні термоелектричних перетворювачів термо-ЕРС, що діє на вимірювальний механізм приладу прямопропорційна кількості теплоти, що виділяється під дією вимірюваного змінного струму і, отже прямопропорційна діючому (або середньоквадратичному) значенню цього струму. Границі вимірювання таких приладів 100мкА..100А, 150мВ..600В. Клас точності 1-1.5.

Електронні вольтметри змінного струму складаються з напівпровідникових випрямлячів (для перетворення змінної напруги в постійну, прямопропорційну вимірюваному параметру напруги), підсилювачів та електромеханічних вимірювальних механізмів. Розрізняють вольтметри середньоквадратичного, середньовипрямленого і амплітудного значення, кожен з яких використовується для вимірювання відповідної величини. В залежності від конструкції розрізняють дві схеми перетворювачів – перетворювачі з закритим і відкритим входом..

Якщо в амплітудному детекторі з **відкритим входом** при вхідній напрузі $U_{вх} = U_0 + U_m \sin \omega t$ значення вихідної напруги відповідає сумі амплітудного значення прикладеної напруги та її постійної складової $U_{вих} = U_0 + U_m$, то для детектора з **закритим входом** в результаті вимірювання постійна складова змінної напруги U_0 буде відсутня, тобто вихідний сигнал буде дорівнювати лише амплітудному значенню сигналу $U_{вих} = U_m$.

Границі вимірювання електронних вольтметрів від 100-200мВ до 10^3 В.

Шкали вольтметрів, призначених для вимірювання змінних напруг, в основному градууються в середньоквадратичних значеннях синусоїдального сигналу (крім імпульсних вольтметрів, що градууються по амплітудних значеннях). Тому для визначення інших параметрів напруги необхідно враховувати коефіцієнт градування приладу і форму змінного сигналу.

Для того, щоб визначити покази різних типів аналогових вольтметрів при подачі змінної напруги необхідно:

- записати математичну модель досліджуваної напруги $u(t)$;
- визначити напругу на яку реагує вольтметр U_p , врахувавши тип входу вольтметра:

$$U_p = \begin{cases} f[u(t)] & \text{- при відкритому вході,} \\ f[u(t) - U_0] & \text{- при закритому вході,} \end{cases} \quad (9)$$

де f - функціональне перетворення в залежності від типу перетворювача - Um , $U_{св}$, $U_{ск}$; U_0 - постійна складова сигналу.

- знайти показ приладу $U_{п}$ на основі U_p і коефіцієнта градування приладу C :

$$U_{п} = C \cdot U_p \quad (10)$$

Значення U_p і C для різних типів аналогових вольтметрів дано в таблиці 2.

Таблиця 2

Тип вольметра	М/Е	Е/М	Е/Д	Е/С	Т/Е	В1, В2	С/К	С/В	І/В	У/В
Значення, на яке реагує вольметр U_p	U_0	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{св}$	$U_{ск}$	$U_{св}$	U_m	U_m
Значення, в яких проградуирований вольметр $U_{град}$	U_0	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	U_m	$U_{ск}$
Значення коефіцієнта градуування С	1	1	1	1	1	2,22 - В1 1,11 - В2	1	1,11	1	0,71

М/Е – прилад магнітоелектричний; Е/М – електромагнітний; Е/Д – електродинамічний; Е/С – електростатичний; Т/Е – термоелектричний; В1 – випрямляч з однонапівперіодною схемою випрямлення, В2 – випрямляч з двонапівперіодною схемою; С/К, СКЗ – середньоквадратичних значень; С/В, СВЗ – середньовипрямлених значень; І/В – імпульсний; У/В – універсальний.

МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ

Приклад 4.1. Синусоїдальний сигнал $U(t)=14,1 + 5,64\sin 25t$, В вимірювали почергово за допомогою двох вольметрів з піковим перетворювачем: з відкритим і закритим входом. Обидва прилади проградуировані в середньоквадратичних значеннях сигналу. Визначити покази приладів.

Розв'язання.

Показ вольметра з відкритим входом:

$$U_{п2} = C \cdot U_m = 0,71 \cdot U_m = 0,71 \cdot 19,74 = 14, \text{ В.}$$

Показ вольметра з закритим входом:

$$U_{п1} = C(U_m - U_0) = 0,71 \cdot (U_m - U_0) = 0,71 \cdot (19,74 - 14,1) = 4 \text{ В.}$$

Де максимальне значення і постійна складова сигналу:

$$U_m = 14,1 + 5,64 = 19,74 \text{ В, } U_0 = 14,1, \text{ В.}$$

Приклад 4.2. За допомогою мілівольметра з закритим входом вимірюється цифровий сигнал (імпульсна послідовність амплітудою U_m , тривалістю імпульсів τ і періодом $T=2\tau$). Прилад має перетворювач пікових значень і середньоквадратичну шкалу. Показ приладу $U_{п} = 50$ мВ. Визначити амплітудне (U_m), середньоквадратичне ($U_{скз}$) і середньовипрямлене ($U_{свз}$) значення вимірюваної напруги.

Розв'язання.

Для вольметра з закритим входом згідно (10) запишемо:

$$U_{п} = C \cdot f[u(t) - U_0] = 0,71 \cdot (U_m - U_0).$$

Для послідовності прямокутних імпульсів з табл. 1 маємо:

$$K_a = K_{\phi} = \sqrt{Q}, \text{ де } Q = T/\tau = 2.$$

Постійна складова сигналу для прямокутних імпульсів:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_x dt = U_m \frac{\tau}{T} = \frac{U_m}{Q}, \text{ тоді } U_{п} = 0,71 \cdot U_m \left(1 - \frac{1}{Q}\right) = 0,71 \cdot U_m \frac{Q-1}{Q}.$$

Отже параметри вимірюваної напруги:

$$U_m = U_{п} \frac{Q}{0,71(Q-1)} = 50 \cdot \frac{2}{0,71} = 140,8 \text{ мВ; } U_{ск} = \frac{U_m}{K_a} = \frac{U_m}{\sqrt{Q}} = \frac{140,8}{\sqrt{2}} = 99,6 \text{ мВ;}$$

$$U_{св} = \frac{U_{ск}}{K_{\phi}} = \frac{U_{ск}}{\sqrt{Q}} = \frac{99,6}{\sqrt{2}} = 70,4 \text{ мВ.}$$

Приклад 4.3. За допомогою вольметра середньовипрямлених значень з закритим входом вимірюється послідовність прямокутних імпульсів амплітудою U_m , тривалістю імпульсів τ і періодом T . Прилад проградуирований в середньоквадратичних значеннях сигналу. Визначити середньоквадратичне, середньовипрямлене і амплітудне значення напруги за показом приладу $U_{п}$.

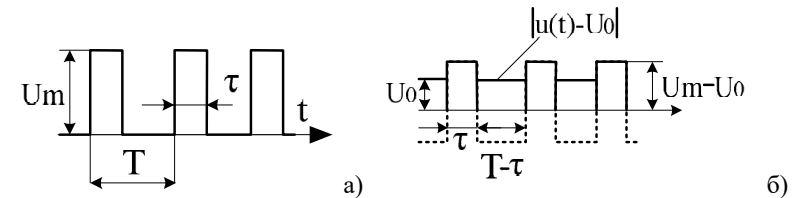


Рис. 4.1. Вимірюваний сигнал а) і сигнал, на який реагує вольметр б).

Розв'язання.

Показ приладу з закритим входом згідно (10):

$$U_{п} = C \cdot U_p = C \cdot f[u(t) - U_0],$$

де f - функція середнього від абсолютного значення напруги $u(t) - U_0$;

$U_0 = U_{\max}/Q = (U_{\max} \cdot \tau)/T$ - постійна складова (середнє значення) сигналу;

Середнє значення випрямленого (по модулю) сигналу $u(t) - U_0$ (з рис. 4.1,б):

$$f[u(t) - U_0] = \frac{(U_m - U_0) \cdot \tau}{T} + \frac{U_0 \cdot (T - \tau)}{T}, \text{ тоді}$$

$$U_{п} = 1,11 \cdot \left[\frac{(U_m - U_0) \cdot \tau}{T} + \frac{U_0 \cdot (T - \tau)}{T} \right] = 1,11 \left[\frac{U_m}{Q} - \frac{U_m}{Q^2} + \frac{U_m}{Q} \left(1 - \frac{1}{Q}\right) \right] = 2,22 \frac{U_m}{Q} \left(1 - \frac{1}{Q}\right)$$

$$\text{Отже: } U_m = \frac{U_{п} \cdot Q^2}{2,22(Q-1)}, U_{ск} = \frac{U_m}{K_a} = \frac{U_{п} \cdot Q \sqrt{Q}}{2,22(Q-1)}, U_{св} = \frac{U_{ск}}{K_{\phi}} = \frac{U_{п} \cdot Q}{2,22(Q-1)}.$$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Визначити і записати U_m , $U_{ск}$ і $U_{св}$ значення синусоїдального сигналу, якщо показ вольметра електромагнітної системи класу точності 0,5 складає 15 В

2. Лабораторний вольметр електромагнітної системи, проградуирований в середньоквадратичних значеннях гармонійного сигналу, показав 1,8В. Визначити пікове, середньоквадратичне і середньовипрямлене значення напруги для сигналу з