

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя

*Кафедра систем  
електроспоживання та  
комп'ютерних технологій  
в електроенергетиці*

**ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ  
ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ**

**НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК**

для студентів електромеханічного факультету  
за напрямом підготовки  
6.050601 – електротехніка та електротехнології  
денної та заочної форм навчання

Тернопіль  
2015

УДК621.753+ 621.317.3  
ББК 30.10+31.221  
Р47

Рецензент

*Карпінський Микола Петрович,*  
доктор технічних наук, професор,  
керівник закладу інформатики університету технології  
та гуманітарних наук у м. Бельсько-Бяла, Польща,  
професор кафедри комп'ютерних наук  
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

*Розглянуто й затверджено на засіданні кафедри систем електроспоживання  
та комп'ютерних технологій в електроенергетиці,  
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя  
Протокол № 8 від 25.03.2014 р.*

*Схвалено й рекомендовано до друку на засіданні методичної комісії  
електромеханічного факультету, Тернопільського національного технічного  
університету імені Івана Пулюя  
Протокол № 6 від 24.04.2014 р.*

**Р47** Решетник В.Я. Основи метрології та електричних вимірювань :  
навчально-методичний посібник для студентів електромеханічного  
факультету / В. Я. Решетник, С. М. Бабюк. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ  
імені Івана Пулюя, 2015. – 160 с.

Запропонований навчально-методичний посібник розроблено відповідно  
до навчальної програми з дисципліни “Основи метрології та електричних  
вимірювань” для студентів електромеханічного факультету за напрямом  
підготовки 6.050601 – електротехніка та електротехнології денної та заочної  
форм навчання.

**УДК 621. 753 + 621.317.3**  
**ББК 30.10 + 31.221**

© Решетник В. Я., Бабюк С. М., 2015  
© Тернопільський національний технічний  
університет імені Івана Пулюя 2015

## **ЗМІСТ**

<b>ПЕРЕДМОВА</b>	7
<b>РОЗДІЛ I. МЕТРИЧНА СИСТЕМА МІР. МІЖНАРОДНА СИСТЕМА ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН</b>	8
1.1. Метрична система мір	8
1.2. Міжнародна система одиниць фізичних величин	11
1.3. Одиниця кількості інформації – біт	20
1.4. Одиниця рівня сигналу – децибел	22
<b>РОЗДІЛ II. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ</b>	23
2.1. Основні поняття і визначення метрології	23
2.2. Засоби вимірювання. Робочі і зразкові засоби вимірювання	25
2.3. Похибки вимірювання. Похибки засобів вимірювання	26
2.4. Забезпечення єдності вимірювань	28
<b>РОЗДІЛ III. НОРМУВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ</b>	32
3.1. Види метрологічних характеристик та їх визначення	32
3.2. Нормування похибок засобів вимірювання. Клас точності засобів вимірювання	39
<b>РОЗДІЛ IV. ДЖЕРЕЛА ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ, ВИДИ ПОХИБОК ЗА ЇХ ПОХОДЖЕННЯМ І ВЛАСТИВОСТЯМИ. ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ</b>	43
4.1. Класифікація похибок за походженням	43
4.2. Закони розподілу ймовірностей випадкових похибок і числові характеристики випадкової похибки. Довірчий інтервал і довірча ймовірність результату вимірювання	44
4.3. Обробка результатів прямих рівноточних багатократних спостережень, представлення результату вимірювань	48
<b>РОЗДІЛ V. АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ</b>	53

5.1. Поняття про аналогові і цифрові сигнали та вимірювальні прилади	53
5.2. Будова і принцип дії електромеханічних вимірювальних приладів	54
5.3. Вимірювальні прилади магнітоелектричної системи	55
5.4. Вимірювальні прилади електромагнітної системи	58
5.5. Вимірювальні прилади електродинамічної системи	60
5.6. Вимірювальні прилади феродинамічної системи	63
5.7. Вимірювальні прилади електростатичної системи	64
<b>РОЗДІЛ VI. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ІНДУКЦІЙНОЇ СИСТЕМИ</b>	68
6.1. Однофазний індукційний лічильник електричної енергії	67
6.2. Ідентифікація електромеханічних вимірювальних приладів	74
<b>РОЗДІЛ VII. ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ І НАПРУГИ. РОЗШИРЕННЯ МЕЖ ВИМІРЮВАННЯ АМПЕРМЕТРІВ І ВОЛЬТМЕТРІВ</b>	78
7.1. Схеми вмикання у вимірювальне коло амперметра і вольтметра за умови меншої похибки	78
7.2. Розширення меж вимірювання амперметрів постійного струму за допомогою шунта і вольтметрів за допомогою додаткового резистора	78
7.3. Вимірювання великих постійних струмів (до 1000 А) за допомогою давачів Холла	81
<b>РОЗДІЛ VIII. ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ</b>	84
8.1. Вимірювальний трансформатор струму	84
8.2. Вимірювальний трансформатор напруги	86
<b>РОЗДІЛ IX. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ І ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ</b>	91
9.1. Вимірювання потужності в колах постійного та однофазного змінного струму	91
9.2. Короткі відомості з теорії трифазних кіл	93
9.3. Вимірювання активної потужності при симетричному навантаженні трифазного кола «зіркою»	93
9.4. Вимірювання активної потужності трифазної мережі методом двох	94

ватметрів (схема Арона)	
9.5. Вимірювання реактивної потужності у трифазних колах	95
<b>РОЗДІЛ X. МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ</b>	<b>101</b>
10.1. Вимірювання опорів методом амперметра і вольтметра	101
10.2. Вимірювання опорів методом вольтметра і методом амперметра	103
10.3. Прямі методи вимірювання опорів постійному струму	104
10.4. Розрахунок опору, виміряного за схемою вольтметра на шкалі кілоомів	105
10.5. Розрахунок опору, виміряного за схемою амперметра на шкалі Омів	106
10.6. Логометричні омметри	107
<b>РОЗДІЛ XI. ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ І ОПОРУ МЕТОДАМИ</b>	
<b>ПОРІВНЯННЯ З МІРОЮ</b>	<b>109</b>
11.1. Компенсатор постійного струму	109
11.2. Автоматичний компенсатор постійного струму	110
<b>РОЗДІЛ XII. МОСТОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ</b>	<b>115</b>
12.1. Міст постійного струму (міст Уїтстона)	115
12.2. Подвійний міст для вимірювання малих опорів (міст Томсона)	117
<b>РОЗДІЛ XIII. МОСТИ ЗМІННОГО СТРУМУ</b>	<b>120</b>
13.1. Умови рівноваги мосту змінного струму. Мости для вимірювання ємності, індуктивності і активного опору	121
13.2. Автоматичний міст змінного струму для вимірювання температури	123
<b>РОЗДІЛ XIV. ПРИНЦИП РОБОТИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО</b>	
<b>ОСЦИЛОГРАФА</b>	<b>125</b>
14.1. Будова електронно-променевої трубки – ЕПТ	125
14.2. Принцип роботи ЕПТ	126
14.3. Функціональна схема електронно-променевого осцилографа	126
<b>РОЗДІЛ XV. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ</b>	<b>132</b>
15.1. Аналого-цифрове перетворення	132
15.2. Коди, які застосовують у ЦВП	133
<b>РОЗДІЛ XVI. ЕЛЕМЕНТИ І БЛОКИ ЦИФРОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ</b>	
<b>ПРИЛАДІВ</b>	<b>137</b>

16.1. Логічні елементи і тригери	137
16.2. Двійковий і двійково-десятковий лічильники	139
16.3. Декодер і знаковий індикатор	140
<b>РОЗДІЛ XVII. ФУНКЦІОНАЛЬНІ СХЕМИ І ПРИНЦИП ДІЇ</b>	
<b>ЦИФРОВИХ ВОЛЬТМЕТРІВ І ЧАСТОТОМІРІВ</b>	144
17.1. Цифровий вольтметр часо-імпульсного перетворення	144
17.2. Цифровий вольтметр двотактного інтегрування – (ЦВДІ)	146
17.3. Цифровий частотомір	147
<b>РОЗДІЛ XVIII. ЕЛЕКТРОННІ І ЦИФРОВІ ЛІЧИЛЬНИКИ</b>	
<b>ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ</b>	150
18.1. Однофазні електронні і цифрові лічильники	150
18.2. Трифазний електронний лічильник і автоматизовані системи контролю і обліку електроенергії	157
<b>ЛІТЕРАТУРА</b>	157

## ПЕРЕДМОВА

Метою вивчення дисципліни "Основи метрології і електричних вимірювань" студентами електротехнічних спеціальностей є набуття знань про методи і засоби вимірювання фізичних величин (параметрів), які характеризують режими роботи електричних систем і їх окремих елементів – генераторів, трансформаторів, повітряних і кабельних ліній електропередачі, електроприймачів. Цими фізичними величинами є параметри режимів електричних систем - напруги, струми, активні і реактивні потужності. Параметрами елементів електричних систем є активний і реактивний опори, ємність та індуктивність. Показниками якості електричної енергії є частота струму в мережі, вірніше її відхилення від номінального значення, відхилення напруги, асиметрія напруг у трифазних мережах та коефіцієнт несинусоїдності напруги. Для керування електричною системою ці величини необхідно вимірювати і здійснювати неперервний контроль за їх відхиленням від номінальних значень. Особливими задачами електричних вимірювань є вимірювання і облік витрат електричної енергії, телевимірювання параметрів режиму електричних магістралей і систем. Крім того, вимірювання неелектричних фізичних величин здійснюється шляхом їх перетворення у електричні і подальшого вимірювання їх як величин електричних.

Основною вимогою до електричних систем є забезпечення високої надійності електропостачання і дотримання енергозберігаючих режимів роботи. Цього можна досягти тільки при наявності сучасних методів і засобів контролю і обліку електроенергії з високою точністю.

Отже, дисципліна "Основи метрології та електричні вимірювання" вивчає методи і засоби для вимірювання електричних величин, принципи їх роботи та їх будову, методи обробки вимірювальної інформації та оцінки похибок вимірювань, регламентовані державними стандартами. Науковою базою правильного використання вимірювальної інформації є галузь науки, яку називають метрологією.

Об'єм посібника відповідає робочій навчальній програмі, розрахованій на 36 год. лекцій, 18 год. лабораторних занять і 18 год. практичних занять.

# РОЗДІЛ I. МЕТРИЧНА СИСТЕМА МІР. МІЖНАРОДНА СИСТЕМА ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

## 1.1. Метрична система мір

**Метрологія** – це наука про вимірювання фізичних величин, про похибки вимірювань і методи обробки результатів вимірювань. Основоположником метрології як науки можна вважати видатного французького математика і астронома П. С. Лапласа (1749-1827 р.) [1]. У часи французької революції 1789 р. Франція була вже національно об'єднаною державою, але в окремих її територіях користувалися різними мірами довжини, маси (ваги), об'єму, площі. Італія і Німеччина ще були роз'єднані і у них також у кожному королівстві чи графстві були свої міри. Такий стан стримував розвиток торгівлі, промисловості і науки. А найбільш розвинутою на той час наука була у Франції та Англії. У французькій Академії на той час зосередились видатні математики і фізики, а саме: Ж. Л. Даламбер, Ж.Л. Лагранж, Г. Монж, П.С. Лаплас, А.М. Лежандр, С. Д. Пуассон, Ж. Б. Фур'є, А. М. Ампер, Д. Ф. Араго та інші. Після проведення політичних реформ новий уряд почав проводити реформи торгівельно-економічні. От тоді вирішили навести порядок з мірами, уніфікувати їх у межах цілої держави. У 1790р. Лапласа призначили головою Метричної Комісії, яка була створена Національними Зборами за зверненням багатьох міст Франції. Міста просили прийняти "єдину тверду систему мір і ваг, яку завжди можна було б перевірити". Почали з міри довжини, яку тоді у Франції вимірювали льє, туазами, королівськими дюймами й ліктями, а в Англії – дюймами, футами, ярдами, милями. Лапласу, як фізику і астроному, прийшла в голову ідея прив'язати міру до якоїсь незмінної земної величини. На той час відлік координат вівся від паризького меридіану і довжину меридіану земної кулі вважали величиною сталою. Французи вибрали паризький меридіан. Спорядили експедицію, виміряли його до 170 разів на довжині 1100 км, на відстані від Дюнкерка до Барселони. Одиницею довжини постановили вважати  $1 \cdot 10^{-7}$  довжини чверті паризького меридіану. Цю одиницю назвали "**метр**".



Домовились ввести в користування менші і більші одиниці, кратні  $10^{-n}$  і  $10^n$  – дециметр, сантиметр, міліметр, кілометр. Виготовили з платини прототип метра – профільну рейку довжиною трохи більшою 1-го метра і нанесли на ній 2 риски на відстані між ними  $1 \cdot 10^{-7}$  довжини чверті меридіана. Згодом цей платиновий прототип метра замінили більш стійким платино-іридієвим (сплав з 90% Pt+10% Ir) еталоном, яким користувались довгий час як міжнародним еталоном до введення нового сучасного еталона метра.

За одиницю маси у метричній системі французькі вчені прийняли масу 1-го кубічного дециметра ( $1 \text{ дм}^3$ ) води при температурі  $+4 \text{ }^\circ\text{C}$  і тиску в 1 атмосферу, назвали його "**кілограм**" і виготовили прототип кілограма у вигляді циліндра з платини. Згодом платиновий прототип кілограма замінили платино-іридієвим циліндром, діаметр і висота якого дорівнюють 39 мм, який донині служить еталоном кілограма. Таким чином була створена основа системи мір, яку називають **метричною**. 10 грудня 1799 р. у Франції директивно, постановою Національних зборів, була введена метрична система мір і ваг, про що було заявлено, що вона призначена "для всіх часів, для всіх народів". У Пруссії і інших королівствах Німеччини метрична система мір була введена у 1868-1872 р., а у Британській імперії і США її почали вводити з 1897 р., але й донині користуються англо-саксонськими мірами.

Отже, Франція запропонувала Світу систему мір, яка в ті часи забезпечувала єдність вимірювань у галузі торгівельно-економічних відносин. Але в цей час стрімко розвивались такі галузі науки як термодинаміка, електротехніка, хімія. Вивчались нові фізичні і фізико-хімічні процеси, відкривались нові фізичні величини і невідомі раніше закони природи. Розширювався обмін інформацією між вченими країн Європи. Це призвело до створення в кінці XIX ст. міжнародної організації – Міжнародного Бюро Мір і Ваг (МБМВ), яка й донині забезпечує єдність вимірювань у всьому світі. У подальшому це призвело до створення Міжнародної системи одиниць фізичних величин.

Об'єкти матеріального світу різняться між собою притаманними їм властивостями. Ці властивості виражають через фізичні величини.

**Фізична величина** – це властивість, спільна для багатьох об'єктів або процесів у якісному вираженні, але різна, індивідуальна для кожного з них – у кількісному. Наприклад, фізичними величинами, які характеризують об'єкт, що рухається, є маса, швидкість, прискорення, довжина шляху. Властивості лінії електропередачі виражають такими фізичними величинами як активний опір, індуктивний опір, напруга, струм, потужність. Фізичні величини, що характеризують властивості технічних об'єктів називають параметрами. Деякі автори числове значення параметра у практиці називають величиною. Таке вживання терміну "величина" є некоректним і інженеру його бажано уникати. Назва фізичної величини відображає її якісні властивості – механічні, теплові, електричні, магнітні і т. ін., а числове значення – її розмір, тобто число одиниць фізичної величини. **Одиниця фізичної величини** – це фізична величина такого розміру, якій за визначенням присвоєно числове значення рівне 1. Наприклад, одиниця маси – кілограм, одиниця довжини – метр, часу – секунда. Фізичні величини, які характеризують один і той же об'єкт чи процес, пов'язані між собою залежностями, які визначаються законами природи. Сукупність пов'язаних цими залежностями фізичних величин, серед яких є декілька таких, що умовно вибрані за незалежні, а всі інші виражені через них називають **системою фізичних величин**. Незалежні фізичні величини в системі називають основними, а всі інші – похідними. Одиницю основної фізичної величини називають основною одиницею, а похідної – похідною одиницею. Сукупність основних і похідних одиниць певної системи утворюють **систему одиниць фізичних величин**. **Основні фізичні величини** – це ті, які умовно приймаються за незалежні від усіх інших фізичних величин цієї системи. Наприклад, у системі **CGS** основними фізичними величинами є довжина, маса, час, а основними одиницями відповідно є сантиметр, грам, секунда. **Похідні фізичні величини** певної системи визначають через основні, пов'язані з ними функціональними залежностями.

Вперше необхідність систематизації і уніфікації одиниць фізичних величин була усвідомлена видатним німецьким математиком К. Ф. Гаусом

(1777 – 1855). Він у 1832 р. запропонував систему одиниць фізичних величин з трьох основних одиниць – довжини (міліметр), маси (міліграм) і часу (секунду). Оскільки електротехніка на той час ще тільки починала розвиватись, електротехнічні величини не були ще відомі, то система Гауса деякий час була достатньою для наукового спілкування. Потім на її основі і за її правилами були розроблені системи одиниць **CGS, CGSE, CGSM, MKS, MKSA**.

Система **MKSA** – (метр; кілограм; секунда; Ампер) була запропонована у 1901р. італійським вченим Джорджі. У цій системі одиниці механічних величин повністю узгоджені з одиницями абсолютної практичної системи одиниць електричних і магнітних величин. Наявність кількох систем одиниць і багатьох несистемних одиниць у торгівельно-економічних і наукових відносинах у ХХ ст. почала стримувати розвиток науки і техніки. У 1960 р. XI Генеральна конференція з мір і ваг (**ГКМВ**) затвердила Міжнародну систему одиниць фізичних величин – Systeme Internationale (**SI**). В сучасному вигляді ця система складається з 7-ми основних, 2-х додаткових і понад 100 похідних одиниць.

## 1.2. Міжнародна система одиниць фізичних величин

**Еталони основних одиниць.** Основні одиниці міжнародної системи одиниць SI представлені в таблиці 1.1. Крім основних одиниць в систему ввели дві додаткові одиниці – радіан і стерадіан. Ці одиниці потрібні для створення похідних одиниць кутової швидкості (рад/с) і кутового прискорення (рад/с<sup>2</sup>).

**Радіан** – кут між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює довжині радіуса. У практиці при обчисленнях тригонометричних функцій частіше за одиницю кута приймають градус (°).

Як відомо, в колі  $2\pi$  радіанів.  $1\text{рад}=360^\circ/6,28=57^\circ 17' 45''$ .

**Стерадіан** – тілесний кут, вершина якого розміщена в центрі сфери і який вирізає на поверхні сфери площу, яка дорівнює площі квадрата, сторона якого дорівнює радіусу сфери. Вимірюють тілесний кут через вимірювання плоского кута і обчислення за формулою  $\Omega=2\pi(1-\text{Cos}\alpha/2)$ , де  $\alpha$  - плоский кут при вершині конуса, утвореного усередині сфери даним тілесним кутом.

# ОСНОВНІ ОДИНИЦІ SI (ДСТУ 3651.0-97)

Таблиця 1.1

Назва величини	Одиниця			ВИЗНАЧЕННЯ
	Одиниця виміру	позначення		
		Між-народне	Українське	
Довжина	метр	m	м	Метр дорівнює довжині шляху, який проходить світло за $1/299792458$ частину секунди [17 ГКМВ, 1983 р.]
Маса	Кілограм	kg	кг	Кілограм є одиницею маси і дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма [3 ГКМВ, 1901 р.]
Час	секунда	s	с	Секунда є час, що дорівнює $9192631770$ періодам випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133 [13 ГКМВ, 1967]
Сила електричного струму	Ампер	A	А	Ампер є сила незмінного струму, який під час проходження по двох безмежно довгих паралельних прямолінійних провідниках малого кругового перерізу, розташованих на відстані 1 м один від одного у вакуумі викликає би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н [9 ГКМВ, 1948 р.]
Термодинамічна температура	Кельвін	K	К	Кельвін є одиницею термодинамічної температури і дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрібної точки води [13ГКМВ, 1967 р.]
Кількість речовини	моль	mol	моль	Моль є кількість речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою 0.012 кг. За застосування моля структурні елементи повинні бути специфіковані і можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами або іншими частинками...[14 ГКМВ, 1971 р.]
Сила світла	кандела	cd	кд	Кандела є сила світла у заданому напрямі від джерела, яке випромінює монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого у цьому напрямі становить $1/683$ Вт/ср.[ ГКМВ, 1979р.]

Система **SI** є когерентною, раціоналізованою і практичною.

Когерентність системи полягає в тому, що при запису формул в одиницях **SI** в

них відсутні перевідні коефіцієнти. У раціоналізованій системі магнітна і електрична сталі дорівнюють  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ; ...  $\epsilon_0 = 10^7 / 4\pi \cdot c^2 \text{ Ф/м}$ . Тому в найуживаніших формулах немає ірраціонального множника  $4\pi$ .

Для зберігання і відтворення одиниць фізичних величин створили і використовують еталони одиниць. Згідно з визначенням законодавчої метрології **еталон одиниці фізичної величини** – це засіб вимірювань (або комплекс засобів вимірювань), який забезпечує відтворення і (або) зберігання одиниці фізичної величини з метою передачі її розміру засобам вимірювань, які стоять нижче у повірочній схемі, виготовлений за особливою специфікацією і офіційно затверджений як еталон. Еталони поділяють на міжнародні і державні, а за точністю – на первинні, вторинні і робочі. Еталони і міри атестують за результатами опрацювання багатократних спостережень. Значенням одиниці фізичної величини вважають математичне сподівання результату багатократних спостережень, а похибку оцінюють двома характеристиками – значенням невиключеної систематичної похибки і середньоквадратичним відхиленням (СКВ) математичного сподівання результатів багатократних спостережень.

Одиниці основних фізичних величин можуть бути відтворені через фундаментальні природні константи. Наприклад, одиницею довжини в системі SI є метр. Згідно з резолюцією ГКМВ 1983р. – **метр (м)** дорівнює довжині шляху, який проходить світло за  $1/299792458$  частину секунди. Отже, еталон метра реалізують через засоби точного вимірювання швидкості світла, за істинне значення якої приймають  $C=299\,792\,458$  м/с і довжини хвилі електромагнітного поля надвисокої частоти.

Одиницею часу в системі SI є **секунда (с)** – час, що дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезія-133. Ми знаємо, що частота і період коливань – це величини взаємно обернені. Отже, якщо частота коливань випромінювання джерела енергії стабільна, то стабільним є й період. Тому еталоном одиниці часу може бути генератор енергії стабільної частоти.

До 1950-х років одиниця часу секунда була прив'язана до природного еталона – періоду обертання Землі навколо своєї осі. Секунда, заснована на цьому еталоні, називалась **секундою світового часу** і дорівнювала  $1/86400$  середньої сонячної доби на меридіані Гринвіча. За відліком добового часу грінвічський меридіан прийнято за нульовий. Повірка здійснювалась за сигналами астрономічного часу, які передавалися в певні моменти часу радіостанцією Гринвічської обсерваторії сигналом 100 кГц. Еталоном секунди був період коливань змінного струму з частотою 100 кГц, поділеною на 100000, тобто до 1 Гц. Сигнал 100 кГц генерований кварцевим генератором найвищої на той час стабільності (нестабільність  $10^{-8}$ ) і синхронізований астрономічним сигналом сходу Сонця, передавався в діапазоні довгих хвиль. Всі обсерваторії Світу його приймали. Прийнятий сигнал 100 кГц підсилювався і подавався на “синхронний годинник,” в якому подільником частоти ділився до частоти 1000 Гц. Далі напруга 1000 Гц подавалась на обмотки синхронного мотора, який приводив в рух стрілки годинника – годинну, хвилинну, секундну і 0,1 секундну. Це були сигнали точного часу. Частоти 100 кГц вторинних кварцевих еталонних генераторів порівнювались з 100 кГц від Гринвіча. Тривалі порівняння результатів спостережень виявили непостійність середньої сонячної доби і світової секунди.

У 1956 р. за абсолютний еталон часу був прийнятий тропічний рік, тобто період обертання Землі навколо Сонця. У цій системі секунда – це інтервал часу, який дорівнює  $1/31\,556\,925\,9747$  тропічного року для 1900 р. січня 0 о 12 год ефемеридного часу. Але астрономічні спостереження за цим часом є тривалими і витратними, тому від 1967 р. перейшли до нової, атомної системи часу. Атомна секунда – інтервал часу, протягом якого здійснюється  $9\,192\,631\,770$  коливань резонансної частоти енергетичного переходу між рівнями надтонкої структури основного стану атому цезія-133 при відсутності збурень зовнішніми полями. Вона відтворюється за допомогою квантових (атомних) мір частоти. Еталон секунди реалізують засобами точного вимірювання частоти випромінювання атомів цезія-133 при переході з стану  $F4$  до стану  $F3$ .

В СРСР в 1978 р. введено в дію атомний еталон частоти з відносною нестабільністю  $10^{-13}$ . Стабільність відтворення частоти водневим молекулярним генератором у Національному Бюро Стандартів США досягає  $5 \cdot 10^{-14}$ . Такі високі точності відтворення часу потрібні для забезпечення безпеки в авіації та космонавтиці, для досліджень у атомній фізиці. Сучасні робочі еталони часу, частоти і довжини, які застосовують при атестації приладів супутникової і геодезичної навігації, в діапазоні  $10^{-9} - 10^8$  с вимірюють час з невиключеною систематичною похибкою  $\Delta \leq 5 \cdot 10^{-6}$  с. Це еквівалентно тому, що інтервал часу у 1157,4 доби ( $\approx 3,215$  роки) вимірюють з похибкою в 5 мікросекунд. А робочий еталон одиниці довжини (метра) при вимірюванні відстаней довжиною від 5 до 3500 м дає абсолютну похибку 0,3 мм/км, що еквівалентно відносній похибці  $0,3 \cdot 10^{-6}$ . Відзначимо, що еталони часу і частоти є найточнішими і найдосконалішими з усіх еталонів.

Одиницею сили струму в системі SI є **Ампер (А)**. Еталон Ампера заснований на електродинамічній взаємодії провідників зі струмом, реалізується через вимірювання механічних величин – сили або моменту сили, і не забезпечує належної точності відтворення. Дослідження точності і стабільності відтворення ампера, проведені на еталонній установці Національного Бюро стандартів (НБС США) – [3] показали, що  $1 A$  (НБС) =  $(1,000008 \pm 0,000006) A$ . Як бачимо, і похибка і нестабільність еталону величини одного порядку –  $(6-8) \cdot 10^{-6} \approx 1 \cdot 10^{-5}$ . Одиниця Ампер була введена в систему одиниць MKSA у 1948 р. і затверджена в SI у 1960 р. В 1962 р. американський фізик Джозефсон відкрив явище, назване ефектом Джозефсона, яке полягає в тому, що на контакті двох надпровідників при протіканні через

них постійного струму при певних умовах виникає ЕРС змінного струму надвисокої частоти, яка дорівнює:

$$E_d = n \cdot (h / 2e) \cdot f,$$

де  $h$  – стала Планка;  $e$  - заряд електрона;

$n = 1, 2, \dots, n$  - номер сходинок на вольт-амперній характеристиці контакту Джозефсона. Відкриття Джозефсона призвело до створення еталона Вольта з

невиключеною систематичною похибкою  $1 \cdot 10^{-8}$ , що значно менше похибки еталона Ампера. Отже, в перспективі можлива заміна в системі SI основної одиниці струму на основну одиницю напруги.

Одиницею термодинамічної температури в системі SI є **Кельвін (К)**. Він дорівнює  $1/273,16$  частині температури потрійної точки води. Еталон Кельвіна реалізують засобами точного вимірювання температури потрійної точки води (температура води, яка знаходиться одночасно в трьох станах – крига, вода, пара) і температури в інших точках міжнародної температурної шкали МТШ-90 – [4]. Згідно з МТШ-90 відтворення одиниці температури в діапазоні від 273,16 К до 1357,77 К реалізується через вимірювання температури в семи опорних (реперних) точках сталої температури:

- потрійна точка води – 273,16 К;
- точка плавлення галію – 302,9146 К;
- точка твердіння індію – 429,7485 К;
- точка твердіння олова – 505,078 К;
- точка твердіння цинку – 692,677 К;
- точка твердіння алюмінію – 933,473 К;
- точка твердіння міді – 1357,77 К.

Для передавання одиниці температури в цьому діапазоні використовують низькотемпературні платинові термоперетворювачі опору ПТО-10 і ПТО-25 з номінальним опором у потрійній точці води ( $0^\circ \text{C}$ ) відповідно 10 Ом та 25 Ом та високотемпературні термоперетворювачі ВТО з номінальним опором 0,6 Ом, проатестовані у відповідних реперних точках.

Одиницею маси в системі SI є **кілограм (кг)**. Кілограм є одиницею маси і дорівнює масі міжнародного прототипа кілограма. Лише одиниця маси відтворюється не природним, а штучно створеним еталоном – міжнародним прототипом кілограма. Еталон маси можна було би відтворити за фундаментальними константами – маси протона і числом Авогадро ( $6,02472 \cdot 10^{23} \text{ г/моль}$ ), але у вимірюванні цих величин ще не досягли високої точності. Тому еталон кілограма визначили як масу води об'ємом  $1 \text{ дм}^3$  при



нормальному атмосферному тиску (101325Па) і температурі + 3,98 °С, а для матеріального втілення цього еталону виготовили прототип **1 кг** маси у вигляді платино-іридієвого циліндра діаметром і висотою 39 мм. Оскільки при найточнішому вимірюванні густини води отримали максимальне значення 0,999972 г/см<sup>3</sup>, то прототип одиниці маси виявився на 28 мкг більшим, ніж був задуманий. Цей первинний еталон одиниці маси за №1 названо Міжнародним прототипом кілограма. Він зберігається у Міжнародному бюро мір і ваг у Севрі (Франція). По ньому звіряють вторинні еталони, виготовлені з сталі або з латуні для країн - учасниць Міжнародної метрологічної Конвенції. У практиці повірки вторинних еталонів маси по первинному абсолютна похибка знаходиться у межах 150 – 190 мкг, що дає відносну похибку  $1,5-2,0 \cdot 10^{-7}$ .

Передача розміру одиниці від міжнародного еталона до робочих засобів вимірювання здійснюється через первинний еталон (державний), від первинного еталона до вторинного і еталона-копії, від еталони-копії або вторинного еталона до робочого еталона. Від робочого еталона одиницю фізичної величини передають зразковим засобам вимірювання, а від них – робочим. Таким чином підтримують єдність і точність вимірювань – [2].

Похідні одиниці визначають через основні за формулами функціонального зв'язку між фізичними величинами. Наприклад, одиницю сили – **Ньютон** виражають за формулою 2-го закону Ньютона  $F = m \cdot g$  через одиниці маси, довжини і часу – **1 Н = 1 кг1м/с<sup>2</sup>**.

Електричну одиницю **Вольт** можна виразити через основні одиниці системи на основі закону балансу енергій. Електродвигун є перетворювачем електричної енергії у механічну. Якщо знехтувати втратами енергії у двигуні, то рівняння балансу електричної і механічної енергій можна записати у вигляді:

$$U \cdot I = M\Omega;$$

$$[B \cdot A] = [H \cdot m / c]; B \cdot A = [(кг \cdot м / с^2) \cdot м] / [с];$$

$$B = кг \cdot м^2 / с^3 \cdot А$$

**Похідні одиниці, що мають власні назви (ДСТУ 3651.1-97) Таблиця 1.2**

Назва фізичної величини	Ім'я	Позначення		Вираження	
	українське	українське	міжнародне	через інші одиниці СІ	через основні одиниці СІ
Плоский кут	радіан	рад	rad	1	м/м
Просторовий кут	стерадіан	ср	sr	1	м <sup>2</sup> /м <sup>2</sup>
Частота	Герц	Гц	Hz		с <sup>-1</sup>
Сила	Ньютон	Н	N		м·кг·с <sup>-2</sup>
Тиск	Паскаль	Па	Pa	Н/м <sup>2</sup>	м <sup>-1</sup> ·кг·с <sup>-2</sup>
Енергія, робота	Джоуль	Дж	J	Н·м	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-2</sup>
Потужність, потік енергії	Ват	Вт	W	Дж/с	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-3</sup>
Електричний заряд	Кулон	Кл	C	А·с	с·А
Напруга, електричний потенціал	Вольт	В	V	Вт/А	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-3</sup> ·А <sup>-1</sup>
Електрична ємність	Фарадей	Ф	F	Кл/В	м <sup>-2</sup> ·кг <sup>-1</sup> ·с <sup>4</sup> ·А <sup>2</sup>
Електричний опір	Ом	Ом	Ω	В/А	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-3</sup> ·А <sup>-2</sup>
Електрична провідність	Сіменс	См	S	А/В	м <sup>-2</sup> ·кг <sup>-1</sup> ·с <sup>3</sup> ·А <sup>2</sup>
Потік магнітної індукції	Вебер	Вб	Wb	В·с	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-2</sup> ·А <sup>-1</sup>
Магнітна Індукція	Тесла	Тл	T	Вб/м <sup>2</sup>	кг·с <sup>-2</sup> ·А <sup>-1</sup>
Індуктивність	Генрі	Гн	H	Вб/А	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-2</sup> ·А <sup>-2</sup>
Термодинамічна температура	градус Цельсія	°С	°С		К
Світловий потік	люмен	лм	lm	кд·ср	кд
Освітленість	люкс	лк	lx	лм/м <sup>2</sup>	кд·м <sup>-2</sup>
Радіоактивність	Бекерель	Бк	Bq		с <sup>-1</sup>
Поглинута доза іонізуючого випромінювання	Грей	Гр	Gy	Дж/кг	м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup>
Ефективна доза іонізуючого випромінювання	Зіверт	Зв	Sv	Дж/кг	м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup>
Активність каталізатора	катал	кат	kat		с <sup>-1</sup> ·моль

### 1.3. Одиниця кількості інформації – біт

Метою вимірювань є отримання інформації. Інформація в загальному сенсі означає певні відомості, сукупність якихось даних, знань тощо. Інформація передається від джерела до приймача сигналами. **Сигнал** – процес зміни за часом фізичного (енергетичного) стану джерела інформації. Сигнали і комбінації сигналів утворюють повідомлення. **Повідомлення** – це сигнали записані на будь-якому природному або штучному носіїв інформації. Приймачами сигналів є як об'єкти живої природи, так і неживої. Сигнали і повідомлення, сприйняті приймачем, використовуються для керування або відразу, одночасно з їх прийманням, або записуються і зберігаються на якихось носіях як відомості. Отже, призначенням інформації є її використання для вибору дії керування. А керування – це приведення динамічної системи до визначеного стану. Будь-який об'єкт чи процес, який має множину станів і може їх змінювати, називають *динамічною* системою. Якщо система має множину станів і може їх змінювати, то апіорі (без досліду, без випробування) невідомо в якому стані вона знаходиться в даний момент часу, тобто вона є **невизначеною**. Ця невизначеність може бути більшою або меншою, тобто її можна оцінити кількісно. На перший погляд – чим більше станів має система, тим більшою є її невизначеність. Але ймовірності знаходження системи в тому чи іншому стані або переходу з одного стану до іншого є неоднаковими і це треба враховувати.

В загальному випадку розглянемо систему  $X$ , яка може знаходитись в одному з множини станів  $x_1, x_2, \dots, x_n$  з ймовірностями  $p_1, p_2, \dots, p_n$ .

Невизначеність системи можна оцінити спеціальною числовою характеристикою, яку названо **ентропією** і яку визначають як функцію

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_a p_i \quad (1.1)$$

де  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  – кількість станів системи,

$p_i$  – ймовірність знаходження в  $i$ -му стані.

Ентропія має такі властивості:

— дорівнює нулю, якщо один з станів вірогідний, а інші неможливі, тобто якщо система визначена;

— для визначеної кількості станів дорівнює максимуму, якщо всі стани рівновірогідні, а при зростанні кількості станів збільшується,

— є характеристикою адитивною, тобто при об'єднанні кількох незалежних систем в одну їх ентропії об'єднуються.

За одиницю ентропії доцільно вибрати ентропію системи з найменшою ентропією. Такою є система з двома рівновірогідними станами. Фізичною моделлю такої системи є дослід з монетою. При підкиданні вона з ймовірністю 0,5 може впасти догори “орлом” або з такою ж ймовірністю догори “решкою”. Математичною моделлю такої системи є однорозрядне двійкове число, у якому з ймовірністю 0,5 може бути записано 0 або 1. Логарифм у формулі (1.1) може мати будь-яку основу  $a > 1$ . Зміна основи призводить до множення ентропії на стале число, а вибір основи рівноцінний вибору одиниці вимірювання ентропії. Враховуючи, що в комп'ютерах будь-яка інформація обробляється в двійковому коді, для обчислення ентропії доцільно вибрати логарифм з основою 2. Підставимо в формулу (1.1)  $p = 0,5$  і отримаємо

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i = - \left( \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} \right) = - \left( \frac{1}{2} \cdot (-1) + \frac{1}{2} \cdot (-1) \right) = 1 \text{ біт} \quad (1.2)$$

Отриману одиницю ентропії назвали бітом – (скорочення від *binary digit* – двійкова цифра). Отже, один розряд двійкового числа можна уявити математичною моделлю динамічної системи з двома рівновірогідними станами, ентропія якої дорівнює 1-му біту.

Інформація, сприйнята приймачем, призначена для вибору дії керування. Приймачем інформації може бути людина, тварина, комаха і навіть одноклітинна амеба, а також будь-яка природна або технічна система. Сигнали інформації, сприйняті приймачем, перетворюються у сигнали керування. Керування завжди є цілеспрямованим. Його метою є встановлення системи у визначений стан. До керування система була невизначеною, її ентропія мала деяке значення більше нуля. Після керування система стала визначеною, її ентропія дорівнює нулю. Отже, введена при керуванні інформація згасила

існуючу до керування ентропію. Значить інформація і ентропія – властивості одної природи, але з різними знаками. Тому кількість інформації можна оцінювати кількістю згашеної ентропії, тобто кількістю бітів.

З вищенаведеного можна зробити наступні висновки:

- джерелами інформації є динамічні системи з множиною енергетичних станів;
- сигнали інформації є наслідком зміни енергетичних станів динамічної системи;
- природа інформації матеріальна, точніше, енергетична;
- кількість інформації, прийнятої приймачем, дорівнює кількості згашеної ентропії;
- **інформація – це сигнали або повідомлення, сприйняті приймачем і перетворені у сигнали керування.**

#### **1.4. Одиниця рівня сигналу – децибел.**

У практиці телефонного та радіозв'язку, а також для оцінки енергетичних характеристик сигналів і шуму використовують поняття рівня сигналу та рівня шуму. Під рівнем сигналу розуміють відношення потужності  $P_x$  або напруги  $U_x$  в деякій точці електричного кола до значення потужності  $P_0$  або напруги  $U_0$ , які вибрані для порівняння. В телефонії потужність  $P_0$  і напругу  $U_0$  називають потужністю і напругою нульового рівня.

Електричний сигнал нульового рівня має  $U_0 = 0,775$  В і  $P_0 = 1$  мВт на опорі 600 Ом. Сигнал нульового рівня генерується на виході в лінію з телефонного апарату при нормальній гучності розмови.

Акустичні сигнали (звукові сигнали і шуми) за рівнем потужності і тиску оцінюють так само, як і електричні. При акустичних вимірюваннях за нульовий рівень приймають тиск  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па – опорний звуковий тиск, який приблизно дорівнює порогу чутності на частоті 1 кГц

Під рівнем акустичного шуму розуміють відношення шумового тиску на барабанну перетинку людини до тиску при відсутності шуму. Відношення рівнів електричних сигналів і звукових сигналів оцінюють однією і тією ж одиницею – децибелом. **Децибел** – це 0,1 частина **Бела**.

Абсолютний рівень електричного сигналу оцінюють різницею логарифмів потужностей або напруг, поданих у Неперах або децибелах. Якщо для оцінки абсолютного рівня беруть формулу

$$p_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_0} \quad \text{Неп (мВт)}, \quad (1.3)$$

то абсолютний рівень за потужністю оцінюють в Неперах, а якщо формулу

$$p_1 = 10 \lg \frac{P_1}{P_0} \quad \text{дБ (мВт)}, \quad (1.4)$$

то абсолютний рівень за потужністю оцінюють у децибелах.

Абсолютний рівень за напругою у Неперах оцінюють за формулою

$$U_1 = \ln \frac{U_1}{U_2} \quad \text{Неп}. \quad (1.5)$$

Абсолютний рівень за напругою у дБ оцінюють за формулою

$$U_1 = 20 \lg \frac{U_1}{U_0} \quad \text{дБ}. \quad (1.6)$$

В телефонії для оцінки рівня сигналів користуються Неперами, а в радіозв'язку та радіомовленні – децибелами. Непер названо прізвищем шотландського математика Джона Непера, який у 1594 р. першим відкрив і застосував у розрахунках логарифми. Олександр Бел – винахідник телефону як засобу зв'язку.

Коефіцієнт підсилення сигналу за напругою показує відношення напруги сигналу на виході пристрою  $U_{\text{вих}}$  до напруги на вході  $U_{\text{вх}}$ .

$$K_u = 20 \lg \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} \quad \text{дБ}. \quad (1.7)$$

Якщо  $U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}} = 1$ ,  $K_u = 0$  дБ,

$U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}} = 10$ ,  $K_u = 20$  дБ,

$U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}} = 100$ ,  $K_u = 40$  дБ і т. д.

Якщо  $U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}} = 0.1$ ,  $K_u = -20$  дБ,

$U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}} = 0.01$ ,  $K_u = -40$  дБ і т. д.

Отже, якщо сигнал на виході пристрою більший за сигнал на вході, то сигнал підсилюється, а коефіцієнт підсилення подається додатними

децибелами. Якщо ж сигнал на виході менше сигналу на вході, то сигнал згасає, а коефіцієнт згасання подається від'ємними децибелами.

**Контрольні запитання:**

- 1) Основні відомості про метричну систему мір і ваг у XVIII столітті.
- 2) Еталони метричної системи мір у XVIII ст.
- 3) Визначення фізичної величини, одиниця фізичної величини, система одиниць фізичних величин.
- 4) Міжнародна система одиниць фізичних величин SI.
- 5) Основні, додаткові і похідні одиниці SI та їх природні еталони.
- 6) Еталони одиниць довжини і часу в SI.
- 7) Еталони Ампера і Вольта.
- 8) Еталони маси і кількості речовини – моля .
- 9) Еталон Кельвіна і МТШ-90.
- 10) Одиниця кількості інформації. Визначення інформації.
- 11) Одиниці рівня сигналу – децибел і непер.

## РОЗДІЛ ІІ. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

### 2.1. Основні поняття і визначення метрології

Одною з задач метрології є обслуговування точних наук – фізики, хімії, астрономії, геодезії, та інших. Як точні науки не допускають нечітких чи багатозначних тлумачень своїх визначень і понять, так і метрологія цього не допускає. Всі визначення метрології є однозначними, встановленими державним стандартом України ДСТУ 2681–94. Метрологія. Терміни та визначення [5], а **єдність вимірювань полягає в дотриманні такого стану вимірювань, при якому всі поняття і визначення трактуються всіма однозначно, а результати вимірювання виражені в законодавчо встановлених одиницях і похибки відомі з заданою ймовірністю.**

**Вимірювання** – пошук значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Значення фізичної величини – це кількісна характеристика властивостей фізичного об'єкта, його стану та процесів, що в ньому відбуваються.

**Пряме (безпосереднє) вимірювання** – вимірювання, при якому шукане значення величини знаходять безпосередньо з дослідних даних, тобто зчитують його зі шкали аналогового приладу або дисплею цифрового. Наприклад, вимірювання напруги вольтметром, струму – амперметром, температури – термометром.

**Посереднє (опосередковане) вимірювання** – вимірювання, при якому шукане значення величини  $X$  знаходять з відомої залежності цієї величини від величин  $Y$ ,  $Z$ ,  $V$ , які вимірюють прямим вимірюванням. Наприклад, вимірювання опору методом вольтметра і амперметра, вимірювання потужності цим же методом.

**Сукупні вимірювання** – одночасні вимірювання кількох однойменних величин, при яких шукані значення величин знаходять розв'язанням системи рівнянь, отриманих при прямих вимірюваннях різних сполучень цих величин. Наприклад, маємо трикутник невідомих опорів, зображений на рис. 2.1. За результатами вимірювань опорів між точками 1-2; 2-3; 1-3 складаємо систему



трьох рівнянь з трьома невідомими. Розв'яжемо систему і знайдемо невідомі.

$$R_{12} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}; R_{23} = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}; R_{13} = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

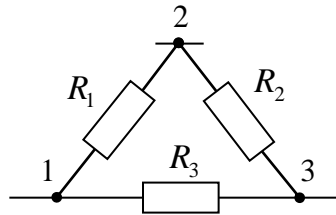


Рис. 2.1 Трикутник опорів

**Сумісні вимірювання** – одночасні вимірювання двох або кількох не однойменних величин для відшукування залежності між ними. Наприклад, індуктивність котушки на змінному струмі  $L = L_0(1 + \omega^2 L_0 C)$ ,

де  $L_0$  – індуктивність на постійному струмі;  $\omega$  – кругова частота;

$C$  – міжвиткова ємність.  $L_0$  і  $C$  не можна виміряти прямим методом,

тому вимірюють  $L_1$  при  $\omega_1$  і  $L_2$  при  $\omega_2$ , отримують два рівняння з двома невідомими. Розв'язують систему і знаходять:

$$L_0 = \frac{L_1 \omega_2^2 - L_2 \omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}; \quad C = \frac{(L_2 - L_1)(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{(L_1 \omega_2^2 - L_2 \omega_1^2)^2}.$$

**Принцип вимірювань** – сукупність фізичних явищ на яких засновані вимірювання. Наприклад, вимірювання температури термопарою засноване на використанні термоелектричного ефекту.

**Метод вимірювань** – сукупність дій з використання принципів і засобів вимірювання;

**Метод безпосередньої оцінки** – метод вимірювань, в якому значення величини визначають безпосередньо по відліковому пристрою вимірювального приладу прямої дії.

**Метод порівняння з мірою** – метод вимірювання при якому вимірювану величину порівнюють з величиною, відтворюваною мірою. **Міра** – засіб вимірювань, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру. Наприклад, вимірювання маси на важільних вагах зі зрівноваженням гирями

(шальками), або вимірювання напруги постійного струму на компенсаторі порівнянням з ЕРС нормального елемента. Гиря – міра маси, нормальний елемент – міра напруги постійного електричного струму.

**Диференціальний ( компенсаційний) метод** – метод порівняння з мірою, при якому на вимірювальний прилад діє різниця вимірюваної величини і відомої величини, відтворюваної мірою.

## **2.2. Засоби вимірювання. Робочі і зразкові засоби вимірювання**

**Засіб вимірювання** – технічний засіб з нормованими метрологічними характеристиками, який використовують для вимірювань.

**Вимірювальний прилад** – засіб вимірювання, призначений для відпрацювання сигналу вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем (прилад зі шкалою і стрілкою, цифровий прилад з рідинно-кристалічним або газорозрядним індикатором).

**Вимірювальний перетворювач** – засіб вимірювання, призначений для відпрацювання сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення опрацювання та (або) зберігання, але в такій, що не може бути сприйнята спостерігачем.

**Первинний вимірювальний перетворювач** – вимірювальний перетворювач, до якого підведена вимірювана величина. Наприклад, термопара в термоелектричному термометрі.

**Рівномірна шкала** – шкала з поділками постійної довжини і з постійною ціною поділки.

**Робочі засоби вимірювань** – засоби вимірювань, які застосовують для вимірювань, не пов'язаних з передачею розміру одиниць фізичних величин. Наприклад, ваги в магазинах чи на ринках, вольтметри і амперметри на щитах електроустановок.

**Зразковий засіб вимірювань** – міра, вимірювальний прилад або вимірювальний перетворювач, які використовують для перевірки по них інших засобів вимірювань і затверджені у якості зразкових.

**Еталон одиниці** – засіб вимірювань (або комплекс засобів вимірювань), який забезпечує відтворення і (або) зберігання одиниці фізичної величини з метою передачі її розміру засобам вимірювань, які стоять нижче у повірочній схемі, виготовлений за особливою специфікацією і офіційно затверджений як еталон. Наприклад, комплекс засобів вимірювань для відтворення метра через довжину хвилі світла, затверджений в Росії як державний еталон метра. Платиноіридієва гиря № 6 в 1 кг, затверджена як еталон-копія кілограма. Група з шести манганінових резисторів з опором 1 Ом, затверджених у статусі еталона Ома.

**Первинний еталон** – еталон, який забезпечує відтворення одиниці з найвищою у країні (порівняно з іншими еталонами тої ж одиниці) точністю.

**Вторинний еталон** – еталон, значення якого встановлюють по первинному еталону.

**Еталон-копія** – вторинний еталон, призначений для передачі розміру одиниці робочим еталонам.

**Робочий еталон** – еталон, який застосовують для передачі розміру одиниці зразковим засобам вимірювань вищої точності, і в окремих випадках – найбільш точним робочим засобам вимірювань.

### **2.3. Похибки вимірювання. Похибки засобів вимірювання**

**Похибка вимірювання** – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Оскільки істинне значення вимірюваної величини залишається невідомим, то у практиці знаходять наближену оцінку похибки, як різницю між вимірним значенням  $X_B$  і дійсним  $X_a$  значенням величини, вимірним приладом вищої точності.

**Абсолютна похибка вимірювання** – похибка вимірювання, виражена в одиницях вимірюваної величини. Абсолютна похибка визначається за формулою:

$$\Delta X = X_B - X_D$$

де  $X_B$  - значення результату вимірювання;

$X_D$  - дійсне значення.

**Відносна похибка вимірювання** – відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. У практиці вимірювань замість істинного значення використовують дійсне значення. Відносна похибка може бути поданою у відсотках. Відносну похибку знаходять за формулою:

$$\delta\% = \frac{X_v - X_d}{X_d} \cdot 100$$

**Систематична похибка вимірювання** – складова похибки, яка залишається незмінною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях тієї самої величини.

**Випадкова похибка вимірювання** – складова похибки вимірювання, яка змінюється випадково при повторних вимірюваннях тієї самої величини.

**Зведена похибка вимірювального приладу** – відношення похибки вимірювального приладу до нормуючого значення.

Нормуюче значення – умовно прийняте значення. Його приймають рівним діапазону вимірювань даного приладу або верхній межі діапазону.

**Основна похибка засобу вимірювань** – похибка засобу вимірювань при його використанні в нормальних умовах.

**Додаткова похибка засобу вимірювань** – зміна похибки при відхиленні параметрів факторів впливу (температури, тиску, напруги живлення і т.п.) від нормальних.

**Межа допустимої похибки засобу вимірювань** – найбільша (без врахування знаку) похибка засобу вимірювань, при якій воно може бути визнане придатним і допущеним до використання.

**Точність засобу вимірювань** – якість засобу вимірювань, яка відображає близькість до нуля його похибок.

**Клас точності засобу вимірювань** – узагальнена характеристика засобу вимірювань, яка визначається межами допустимих основних і додаткових похибок.

**Повірка засобу вимірювань** – визначення метрологічним органом похибок засобу вимірювань і встановлення його придатності до використання.

## 2.4. Забезпечення єдності вимірювань

Відсутність міжнародних зв'язків на перших етапах розвитку суспільства призвела до того, що у кожного народу сформувалися свої одиниці вимірювання довжини, площі, маси і об'єму. Різноманітність одиниць вказаних фізичних величин проіснувала до кінця XIX ст. Але традиції настільки сильні, що навіть тепер, у XXI ст. при законодавчо прийнятій метричній системі мір, об'єм нафти на світовому ринку вимірюють не в літрах, а в барелях, а відстані, пройдені морськими судами – у милях. Незручність користування різними одиницями почала проявлятися при об'єднанні і централізації європейських країн. Усунути ці незручності законодавчим шляхом вирішила Франція, прийнявши у себе і запропонувавши «усім народам» метричну систему мір. Це був перший крок до встановлення єдності вимірювань у сучасному світі.

В сучасному світі єдність вимірювань відіграє дуже важливу, навіть основну, роль у розвитку науки, техніки, промисловості. Без забезпечення єдності вимірювань у сучасному світі не могли би вироблятися прогресивні засоби виробництва – автоматичні лінії і роботи, автомобілі, літаки і ракети, комп'ютерна техніка і техніка зв'язку. Тому всі економічно розвинені країни забезпечують єдність вимірювань як у межах своєї країни, так і на міжнародному рівні.

Забезпечення єдності вимірювань здійснюється на трьох рівнях – на законодавчому, організаційному і науково-технічному. На законодавчому рівні держава видає і впроваджує відповідні законодавчі акти, впроваджує внутрішні і міжнародні стандарти, приймає участь у міжнародних організаціях і конференціях з підтримання єдності вимірювань. На організаційному рівні держава створює і фінансує відповідні організації, які виконують практичну роботу по підтриманню єдності вимірювань у країні – забезпечують країну необхідною кількістю зразкових засобів вимірювань і еталонів, їх зберігання і підтримання у належному стані, контролюють стан робочих засобів вимірювань і виконують роботу з перевірки їх на всіх рівнях. На науково-технічному рівні держава проводить наукові і проектно-конструкторські роботи зі створення нових робочих і зразкових засобів вимірювань вищого класу

точності. Організаційну основу метрологічного забезпечення єдності вимірювань в кожній країні формує **метрологічна служба** – мережа державних і відомчих метрологічних органів, діяльність яких спрямована на забезпечення єдності вимірювань.

Метрологічну службу України [6] очолює Департамент технічного регулювання та споживчої політики – Держспоживстандарт, підпорядкований Міністерству економічного розвитку. У його складі наразі функціонують 28 державних центрів стандартизації, метрології та сертифікації, які розташовані у всіх обласних центрах, АР Крим та Севастополі. Крім того, до складу державної метрологічної служби України входить головна організація із забезпечення єдності вимірювань – Науково-навчальний центр “**ІНСТИТУТ МЕТРОЛОГІЇ**” з науково-дослідним інститутом у м. Харкові, Науково-дослідний інститут “**НДІ СИСТЕМА**” у Львові, державне підприємство ДП “Укрметртестстандарт” з службами єдиного часу і еталонних частот, стандартних зразків речовин та матеріалів, стандартних довідкових даних.

Організації метрологічної служби покликані виконувати такі завдання:

- установлення одиниць фізичних величин;
- формування системи державних еталонів одиниць фізичних величин;
- розроблення методик і засобів передачі розмірів одиниць фізичних величин до зразкових і робочих засобів вимірювання;
- розроблення наукових, правових норм і правил, необхідних для досягнення єдності та точності вимірювань;
- державний метрологічний контроль за станом робочих і зразкових засобів вимірювань на підприємствах;
- проведення державних випробувань, повірки та метрологічної атестації засобів вимірювань;
- сертифікацію засобів вимірювальної техніки.

На міжнародному рівні єдність вимірювань забезпечується міжнародними організаціями – Міжнародним Бюро мір і ваг (МБМВ) і Міжнародною організацією законодавчої метрології (МОЗМ). МБМВ було створене у 1875 р.

У 1870 р. Російська Академія Наук запропонувала скликати у Парижі міжнародну нараду, на якій обговорити питання про необхідність встановлення єдиних для всіх країн прототипів мір. На цій нараді була створена міжнародна комісія, якій було доручено виготовити прототипи єдиних мір довжини і маси. В 1872 р. ця комісія прийняла рішення про створення платино-іридієвих еталонів метра і кілограма. 20.05.1875 р. 17 країн, в тому числі й Росія, на Міжнародній Дипломатичній конференції з метру, для забезпечення міжнародної єдності і вдосконалення метричної системи підписали Метричну конвенцію. У відповідності з цією конвенцією встановлювалась міжнародна співпраця країн, що її підписали, шляхом створення міжнародного наукового закладу – Міжнародного Бюро Мір і Ваг у м. Севр (біля Парижу), утримуваного на кошти сторін, що її підписали;

- Міжнародного Комітету Мір і Ваг у складі вчених з різних країн для керування МБМВ;

- Скликання не рідше 1-го разу в 6 років Генеральної Конференції з Мір і Ваг (ГКМВ).

Після цього у Франції було виготовлено еталони метра і кілограма, які роздали країнам-учасникам Конвенції. Росії було передано еталон метра №28 і еталон кілограма №12. Зараз вони зберігаються в Російському Науково-дослідному інституті Метрології ім. Д. Менделєєва. З ініціативи Д. Менделєєва і під його керівництвом у 1893р. в Росії була створена Головна Палата Мір і Ваг, а у 1901р. у Харкові була створена перша в Україні Палата торгівельних мір і ваг. На базі цієї Палати у СРСР був створений Харківський Державний Інститут мір і вимірювальних приладів – ХДІМВП, який згодом перейменували в Науково-дослідний інститут метрології (Х Д Н Д І М). На базі цього Інституту в Україні створено науково-виробниче об'єднання **НВО "МЕТРОЛОГІЯ"**, яке є зараз провідним науковим закладом з метрології.

### **Контрольні запитання:**

- 1). Визначення єдності вимірювань.
- 2). Вимірювання. Види і методи вимірювання.
- 3). Засоби вимірювання. Робочі і зразкові засоби вимірювання.
- 4). Похибки вимірювання. Способи вираження похибок вимірювання.
- 5). Похибки засобів вимірювання.
- 6). Забезпечення єдності вимірювань на трьох рівнях.
- 7). Забезпечення єдності вимірювань в Україні на державному рівні.
- 8). Метрологічна служба та її завдання.
- 9). Забезпечення єдності вимірювань на міжнародному рівні



## РОЗДІЛ ІІІ. НОРМУВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

### 3.1. Види метрологічних характеристик та їх визначення

З метою дотримання єдності вимірювань у всіх галузях народного господарства, економіки і торгівлі, у науковій діяльності і освіті державний стандарт України до використання допускає засоби вимірювань з нормованими метрологічними характеристиками. У відповідності до ГОСТ 8.009-84 основними метрологічними характеристиками засобів вимірювання (ЗВ) є такі:

- функція перетворення;
- номінальна статична характеристика перетворення вимірювального перетворювача;
- чутливість, стала і ціна поділки вимірювального приладу;
- діапазон вимірювань, межі вимірювань;
- характеристики похибок засобів вимірювань;
- варіація;
- вхідні і вихідні характеристики засобів вимірювань.

**Функція перетворення** – це залежність між вихідною величиною (вихідним сигналом) ЗВ і його вхідною величиною (вхідним сигналом) при нормальних умовах навколишнього середовища. Цю залежність називають також «градуальною характеристикою». Вона може бути представлена аналітично ( у вигляді рівняння), графічно або таблицею. Наприклад, функція перетворення амперметра постійного струму магнітоелектричної системи може бути представлена рівнянням (3.1) – [с.57]

$$\alpha = \frac{BSn}{G} I \quad (3.1)$$

При нормальних умовах конструктивні параметри  $B, S, n, G$  незмінні, функція перетворення лінійна, шкала приладу рівномірна. При аналітичному представленні функції перетворення можна бачити додаткові похибки, які виникають при відхиленні умов експлуатації від нормальних і можна їх обчислити. Наприклад, магнітна індукція  $B$  і питомий момент пружини  $G$  - це

величини, які суттєво залежать від температури, тому при відхиленні температури від температури нормальних умов похибка приладу зростає.

**Номінальна статична характеристика перетворення вимірювального перетворювача** – це те саме, що функція перетворення ЗВ. Вона так само може бути виражена формулою або таблицею, а для масштабних перетворювачів – числом. Наприклад, для вимірювальних трансформаторів струму й напруги – коефіцієнтом трансформації.

**Чутливість  $S$  аналогового вимірювального приладу** – це відношення переміщення  $\Delta\alpha$  покажчика уздовж шкали приладу до зміни вимірюваної величини  $\Delta X$ , що призвела до цього переміщення,

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X} \quad (3.2)$$

Залежно від функції перетворення чутливість вимірювального приладу може бути постійною або змінною у всьому діапазоні вимірювання. При лінійній функції перетворення, як у магнітоелектричного амперметра, чутливість постійна на всій шкалі, а при квадратичній, як у електромагнітного амперметра змінного струму, чутливість змінна. Вона мала на початку діапазону (приблизно до 20-25% шкали), більша і приблизно постійна в робочій зоні 25-80% і знову зменшена на ділянці від 80% до 100% шкали.

Величину, обернену чутливості, називають сталою приладу  $C = 1/S$ .

У приладах прямого вимірювання значення  $S$  дорівнює числу поділок на цілу або кратну одиницю вимірюваної величини, а значення  $C$  – ціну одної поділки шкали або одиниці найменшого розряду цифрового приладу в цілих або кратних одиницях вимірюваної величини. Нормування характеристики  $C$  застосовують для гальванометрів і лічильників. Гальванометри застосовують як нуль-індикатори у приладах що використовують метод порівняння з мірою. Похибка вимірювання методом порівняння залежить від чутливості гальванометра. Нормувати похибки гальванометра немає потреби. Тому чутливість або “стала за струмом” є основною метрологічною характеристикою гальванометра.

Для інтегруючих приладів (індукційних та електронних лічильників електроенергії) нормованою метрологічною характеристикою є *стала* приладу. Наприклад, метрологічною характеристикою лічильника електроенергії є його *передаточне число* – кількість обертів за 1кВт/годину спожитої енергії. Передаточне число лічильника вказується на його щитку: «1 кВт/год =  $N_0$  обертів диска». Величина, обернена передаточному числу, позначається як  $C_n$  і називається *номінальною сталою* лічильника. Вона дорівнює кількості електроенергії, відрахованої лічильником за 1 оберт.

$$c_n = \frac{3600 \cdot 1000}{N_0} \left[ \frac{Вт \cdot с}{оберт} \right] \text{ і тоді } W = c_n \cdot N \quad (3.3)$$

Крім характеристики «чутливість» для вимірювальних приладів і перетворювачів існує характеристика «*пори́г чутливості*». Для вимірювального приладу зі шкалою це те мінімальне значення вимірюваної величини, при якому стрілка відхилиться на мінімальний візуально помітний кут на шкалі.

У практиці користування засобами вимірювань слід розрізняти ці два поняття.

*Діапазон вимірювань*, межі вимірювань – це область значень вимірюваної величини для якої нормовані допустимі похибки даного засобу вимірювання. У вимірювальних перетворювачах він називається *діапазоном перетворення*. Діапазон вимірювань обмежений з обох боків – мінімальним і максимальним значеннями, які називають межами вимірювань. Діапазон вимірювань може бути поділений на кілька частин (піддіапазонів).

У приладів з нерівномірною шкалою (прилади електромагнітної і електродинамічної систем) ділянка шкали 0 – 20% є неробочою, похибки вимірювання на цій ділянці не нормуються. Діапазон показів такого приладу 0-100%, а діапазон вимірювань 20% - 80%. Тому слід розрізняти ці два поняття.

*Характеристики похибок засобів вимірювання.* Залежно від виду ЗВ його похибки виражають у формі абсолютної, відносної або зведеної похибки. Наприклад, *похибку міри* виражають у формі абсолютної похибки, яка дорівнює різниці між номінальним значенням міри і дійсним значенням відтвореної нею величини:

$$\Delta = X_{ном} - X_{\partial} \quad (3.4)$$

Похибку масштабних вимірювальних перетворювачів (вимірювальних трансформаторів струму й напруги) виражають через абсолютну або відносну похибку коефіцієнта перетворення. Абсолютна похибка дорівнює

$$\Delta = K_{ном} - K_{\partial} \quad (3.5)$$

Відносну похибку визначають за формулою

$$\delta\% = \frac{K_{ном} - K_{\partial}}{K_{ном}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Вибір абсолютної чи відносної похибки при нормуванні залежить від виду і властивостей ЗВ. У деяких ЗВ похибка не залежить від значення вимірюваної величини, тобто постійна у всьому діапазоні вимірювань. Таку похибку називають *адитивною*. Прикладом такої похибки є похибка електромеханічних приладів від тертя осі стрілки в опорах. Якщо приладу притаманна тільки адитивна похибка або вона більша за всі інші складові похибки, то похибку такого приладу доцільно нормувати абсолютною похибкою. Але в багатьох ЗВ похибка змінюється пропорційно значенню вимірюваної величини. Таку похибку називають *мультиплікативною*. Якщо мультиплікативна похибка лінійно зростає із зростанням вимірюваної величини, то відносна похибка залишається незмінною у всьому діапазоні вимірювання. Отже, якщо приладу притаманна мультиплікативна похибка, то його похибку доцільно нормувати як відносну або як зведену.

У багатьох ЗВ адитивна і мультиплікативна похибки присутні разом. Формула результуючої похибки в цьому випадку повинна мати вигляд двочлена

$$\Delta = \Delta_0 + \delta X \quad (3.7)$$

де  $\Delta_0$  - адитивна складова похибки;

$\delta X$  - мультиплікативна складова

Окрім абсолютної і відносної похибок для нормування ЗВ застосовують *зведену похибку*. Зведеною похибкою  $\gamma$  називають відношення абсолютної

похибки  $\Delta$  до деякого нормуючого значення  $X_N$ .

$$\gamma\% = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100 \quad (3.8)$$

Значення  $X_N$  встановлюється стандартами на окремі види ЗВ. Частіше за все за нормуюче значення беруть довжину діапазону вимірювання даного ЗВ або верхню межу діапазону, якщо він починається з нуля.

Похибка засобу вимірювання залежить від умов, у яких виконуються вимірювання. Перш за все від умов навколишнього середовища – температури, тиску й вологості повітря, наявності чи відсутності магнітного поля, положення приладу – горизонтальне чи вертикальне. Похибка ЗВ нормується для нормальних умов. Нормальні умови для кожного виду ЗВ встановлюються стандартами і оговорюються в технічному паспорті. Наприклад, у паспорті на амперметри і вольтметри змінного струму електромагнітної системи Е340, Е341, Е346 записано що вони «призначені для експлуатації в умовах помірного клімату в закритих опалюваних приміщеннях при температурі навколишнього повітря від  $-10$  до  $+ 44^{\circ}\text{C}$  і відносній вологості  $90\%$ ». Похибка ЗВ при нормальних умовах називається *основною похибкою*. При користуванні ЗВ в умовах, відмінних від нормальних, у ЗВ з'являється *додаткова похибка*. Вона з'являється при відхиленні від встановлених значень одної чи кількох величин, що характеризують умови. Ці величини називають факторами впливу. Цими факторами можуть бути параметри навколишнього середовища – температура, атмосферний тиск, вологість, напруженість електричного чи магнітного полів, спотворення форми кривої напруги живлення. При вимірюванні електричних величин електромеханічними приладами найчастіше проявляються додаткові похибки від зміни температури і напруженості магнітного поля у місці розміщення ЗВ. У багатьох ЗВ додаткову похибку від впливу температури компенсують введенням у вимірювальну схему температурної компенсації. Додаткові похибки від впливу магнітних полів виключають, застосовуючи астатичні вимірювальні схеми. При живленні електронних ЗВ від нестабілізованих джерел напруги проявляються додаткові похибки від зміни

напруги живлення. Якщо ЗВ не захищений від додаткових похибок, то їх допустимі значення нормують і вказують у паспорті. Наприклад, «додаткова температурна похибка вольтметра складає  $\pm 1\%$  на  $10^0\text{C}$ ».

**Статична і динамічна похибки ЗВ.** Статична похибка ЗВ – похибка ЗВ при вимірюванні величини незмінної у часі або такої, що повільно змінюється. Якщо вимірювана величина є змінною в часі, то виникає динамічна похибка. Вона залежить від інерційних властивостей ЗВ. В електромеханічних приладах вона визначається моментом інерції рухомої частини. Якщо вимірювана величина змінюється повільно, то стрілка встигає рухатись вздовж шкали і відслідковувати виміряне значення. При швидкій зміні вимірюваної величини через великий момент інерції відлікового пристрою стрілка не встигає рухатись з тою швидкістю, з якою змінюється вимірювана величина. В динамічному режимі до статичної похибки додається **динамічна похибка** ЗВ, яка дорівнює різниці між похибкою у динамічному режимі і його статичною похибкою для значення величини в даний момент часу. Динамічні властивості ЗВ відображаються його перехідною або частотною характеристикою. **Перехідна характеристика ЗВ – це його реакція на поданий до входу одиничний східчастий сигнал.** Таким сигналом є вимірювана величина постійного значення. При підключенні вимірюваної величини (напруги чи струму) до входу електромеханічного вимірювального приладу у ньому проходять електромагнітний і електромеханічний перехідні процеси, тривалість яких визначається параметрами конструктивних елементів (опори і індуктивності обмоток, момент інерції рамки на осі). Після закінчення перехідних процесів стрілка встановлюється на відповідній поділці шкали. Для оцінки динамічних властивостей електромеханічних приладів використовують нормовану характеристику **«час встановлення показань приладу»**. Для більшості електромеханічних стрілочних приладів цей час не перевищує 4 с. Зрозуміло, що такі прилади використовують для вимірювання незмінних у часі величин або таких що дуже повільно змінюються. Динамічна похибка для таких приладів не нормується. Для спостереження і реєстрації швидкопротікаючих

процесів використовують електронні і цифрові вимірювальні прилади. Динамічні властивості цих приладів оцінюють їх швидкістю – **числом вимірювань за секунду**. Зрозуміло, що ця характеристика властива цифровим і мікропроцесорним ЗВ.

**Варіація показань вимірювального приладу** (ВП) – різниця показів приладу при одному й тому ж значенні вимірюваної величини. Її визначають при плавному наближенні покажчика ( стрілки ) до відповідної поділки шкали від початку шкали і від кінця. Варіація показів характеризує стійкість показів при одних і тих самих умовах вимірювання одної і тої ж незмінної величини. Причиною варіації показань в електромеханічних приладах є тертя в опорах рухомої частини вимірювального механізму. Варіацію обчислюють як

$$b = \Delta_K - \Delta_n \quad (3.9)$$

де  $\Delta_K$  і  $\Delta_n$  - абсолютні похибки приладу при наближенні покажчика до відповідної поділки від кінця шкали та від початку, відповідно.

**Вхідні і вихідні характеристики** засобів вимірювання. При будь яких вимірюваннях ЗВ вмикається в електричне коло, параметри якого вимірюються або неперервно контролюються. Підключення ЗВ до контрольованого кола не повинно змінювати параметри режиму цього кола, інакше результати вимірювань будуть спотворені. Щоб підключення приладу або вимірювального перетворювача до контрольованого кола суттєво не змінювало його параметри, необхідно щоб вхідні й вихідні параметри ЗВ були сумісні з параметрами контрольованої електроустановки. Цими параметрами ЗВ є: **внутрішній, вхідний і вихідний опір**.

Для електромеханічних амперметрів і вольтметрів похибки повинні нормуватися при вказаному внутрішньому опорі. А похибки вимірювальних трансформаторів нормуються при нормованому опорі навантаження. Для електронних вимірювальних перетворювачів і вольтметрів нормованими характеристиками є вхідний і вихідний опори.

### 3.2. Нормування похибок засобів вимірювання. Клас точності ЗВ

Нормування похибок – це встановлення границь знизу і зверху, за межі яких похибка не повинна виходити при встановлених умовах використання ЗВ. При нормуванні похибки ЗВ стандартом встановлюють вигляд і параметри функцій, які обмежують області допустимих значень основної і додаткових похибок. Залежно від допустимих значень похибок засобам вимірювань присвоюють класи точності. *Клас точності* – це узагальнена характеристика ЗВ, яка визначається межами допустимих основної і додаткових похибок, а також іншими властивостями, які впливають на точність засобу (варіація, нестабільність значення міри). У зв'язку з великою різноманітністю засобів вимірювань стандартом визначено кілька способів встановлення класу точності. Вибір способу залежить від властивостей похибок даного ЗВ.

Межа допустимої похибки ЗВ може встановлюватись у вигляді абсолютної, відносної або зведеної похибки. Вибір того чи іншого вигляду залежить від властивостей похибки в діапазоні вимірювань. Для тих ЗВ, яким властива тільки адитивна похибка або адитивна значно більша за мультиплікативну, межа допустимої абсолютної похибки є незмінною у всьому діапазоні вимірювань, в той час як відносна похибка за визначенням змінюється гіперболічно. Тому для таких ЗВ зручно нормувати абсолютну похибку, бо нормоване значення може бути виражене одним числом:

$$\Delta_{\text{доп}} = \pm \alpha \quad (3.10)$$

Такий запис означає, що абсолютна похибка ЗВ в будь-якій точці діапазону не перевищує  $\alpha$  одиниць вимірюваної величини.

Але при нормуванні за абсолютною похибкою неможливо порівнювати між собою за точністю ЗВ з різними діапазонами вимірювання. Тому для електровимірювальних приладів застосовують нормування зведеної похибки, яку визначають за формулою

$$\gamma\% = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100 \quad (3.11)$$



де  $X_N$  – нормуюче значення. Допустиме значення  $\gamma\%_{\text{дп}}$  постійне у всьому діапазоні і може бути представлене одним числом.

Нормуюче значення вибирають залежно від виду шкали і меж вимірювання. Якщо шкала рівномірна або степенева і починається з нуля або нуль знаходиться за діапазоном вимірювань, то за нормуюче значення обирають верхню межу діапазону. Для таких же приладів з нульовою поділкою всередині діапазону за нормуюче значення приймають суму модулів меж вимірювання. Якщо прилад призначений для вимірювання відхилення величини від номінального значення, за нормуюче значення приймають номінальне значення. Для приладів з суттєво нерівномірною шкалою за нормуюче значення приймають довжину шкали.

Для засобів вимірювань з мультиплікативною похибкою зручніше нормувати межу допустимої *відносної похибки*, бо її значення є постійним у всьому діапазоні, а значення абсолютної похибки лінійно змінюється по діапазону. Межа допустимої відносної похибки виражається одним числом:

$$\delta_{\text{дон}} = \pm c \quad (3.12)$$

Цей запис означає, що відносна похибка ЗВ у будь-якій точці діапазону вимірювань не перевищує  $c$  процентів від показу ЗВ. Межа допустимої абсолютної похибки може бути обчислена за формулою

$$\Delta_{\text{дон}} = \pm c X_{\text{в}} / 100 \quad (3.13)$$

де  $X_{\text{в}}$  – виміряне значення.

Прикладом такого способу нормування похибки є похибки лічильників електроенергії, мостів постійного і змінного струму.

Для засобів вимірювання, похибки яких нормовані у вигляді відносних або зведених похибок, вводять окрему характеристику – **клас точності**.

Клас точності – це узагальнена характеристика ЗВ, яка визначається межами основної і додаткових похибок, а також і другими властивостями, що впливають на точність. Якщо межа допустимої похибки ЗВ виражена у вигляді відносної або зведеної похибки, похибка повинна задовольняти умові:

$$\delta\% \leq \pm c \quad \text{або} \quad \gamma\% \leq \pm c, \quad (3.14)$$

де  $c$  – число, яке позначає клас точності. За стандартом це число обирають з ряду:  $1 \cdot 10^n$ ;  $1,5 \cdot 10^n$ ;  $2 \cdot 10^n$ ;  $4 \cdot 10^n$ ;  $5 \cdot 10^n$ ;  $6 \cdot 10^n$ ;  $n = 1; 0; -1; -2$  і т.д. Цей спосіб застосовують при нормуванні похибки однозначних мір і масштабних перетворювачів. У цьому випадку число, яке позначає клас точності і межа допустимої відносної похибки, вираженої у % співпадають. Клас точності позначають числом  $c$ . Наприклад, для котушки опору з класом точності 0,01 встановлюється межа допустимої відносної похибки 0,01%. Так само позначається клас точності ЗВ, нормованих зведеною похибкою  $\gamma$  % . При відомому  $\gamma$  % можна знайти межі допустимої відносної похибки результату вимірювання для будь-якого показу приладу згідно формули:

$$\delta = \pm(X_K / X)\gamma \quad (3.15)$$

Умовне позначення класу точності ЗВ, нормованого за зведеною похибкою залежить від вибору нормуючого значення. Якщо нормуюче значення:

$$X_N = 0 - X_K = X_K, \quad (3.16)$$

то клас точності позначають числом, рівним зведеній похибці. Наприклад:

$$\text{при } X_H = 0 \quad \gamma\% = \frac{\Delta}{X_K - X_H} \cdot 100 = 1,5, \quad (3.17)$$

то клас точності позначають так – 1,5.

Якщо  $X_H \neq 0$ , і  $\gamma\% = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100 = 1,5$ , то так L1,5

Для нормування похибок ЗВ з адитивною і мультиплікативною похибками застосовують формулу

$$\delta_{\text{дв}} = \pm[c + d(|X_k / X| - 1)] \quad (3.18)$$

де  $\delta_{\text{дон}}$  – межа допустимої відносної похибки, %;

$X_K$  - кінцеве значення діапазону вимірювань;

$c$  і  $d$  – постійні додатні числа.

Значення  $c$  чисельно дорівнює відносній похибці на верхній межі діапазону вимірювання у %, число  $d$  – відносній похибці на нижній межі,

вираженій у % верхньої межі. За цим способом нормують похибки магазинів опорів і цифрових вольтметрів. Наприклад, похибка магазину опорів пронормована формулою  $\delta_{\text{дв}} = \pm[0,05 + 4 \cdot 10^{-6}(|X_k / X| - 1)]$ . В цьому випадку умовне позначення класу точності має вигляд:  $0,05 / 4 \times 10^{-6}$ .

Разом з основною похибкою нормують і додаткові похибки. Для ЗВ електричних величин додаткові похибки з'являються при виході за межі нормальних умов навколишнього середовища таких факторів впливу:

- температури;
- напруженості магнітного поля;
- напруги, частоти і несинусоїдності напруги живлення;
- коефіцієнта потужності (для ватметрів і лічильників електроенергії).

Номинальні значення або діапазони зміни і межі робочої області значень цих величин повинні бути вказані у технічній документації, доданій до ЗВ. За межами нормального діапазону, але у межах робочої області похибка ЗВ буде складатися з основної і додаткової похибок.

### **Контрольні запитання:**

1) Види метрологічних характеристик та їх визначення

- функція перетворення;
- номінальна статична характеристика перетворення вимірювального перетворювача;
- чутливість, стала і ціна поділки вимірювального приладу;
- діапазон вимірювань, межі вимірювань;
- характеристики похибок засобів вимірювань;
- варіація;
- вхідні і вихідні характеристики засобів вимірювань.

2) Нормування похибок засобів вимірювання:

- зведена похибка ЗВ;
- основна і додаткова похибки ЗВ;
- клас точності ЗВ

## **РОЗДІЛ IV. ДЖЕРЕЛА ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ, ВИДИ ПОХИБОК ЗА ЇХ ПОХОДЖЕННЯМ І ВЛАСТИВОСТЯМИ. ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ**

### **4.1. Класифікація похибок за походженням**

Результуюча похибка вимірювання створюється сумою багатьох складових. За джерелом походження основними з них є *методичні, інструментальні й суб'єктивні*, а за властивостями – *систематичні і випадкові*.

*Методичні похибки ЗВ* виникають через недосконалість методу вимірювання, втіленого у засіб вимірювання, через вплив ЗВ на режим електричного кола при приєднанні до нього. Наприклад, при вмиканні в електроустановку вольтметра з малим вхідним опором або амперметра з великим опором зміняться і напруга і струм. Методична похибка виникає також при використанні для градуювання емпіричних формул і т.і.

*Інструментальні похибки ЗВ* є наслідком конструктивних і технологічних недоліків – невдало вибраних схем, температурно і магнітно нестабільних матеріалів, зносу елементів.

*Суб'єктивні* (особисті) похибки – похибки, пов'язані з недосконалістю органів відчуття оператора, його індивідуальними властивостями.

*Систематичні похибки ЗВ* – складові похибок ЗВ, які залишаються постійними або закономірно змінюються при повторних вимірюваннях однієї тієї ж величини при незмінних умовах. Наприклад, систематичною може бути похибка градуювання шкали приладу, методична похибка, похибка ЗВ від нестабільності напруги живлення. Виявлені систематичні похибки можна виміряти або обчислити і в результат вимірювання ввести компенсуючу поправку. При обробці результатів вимірювань бажано виявити і виключити всі складові систематичної похибки. Якщо це вдається, то в результаті вимірювання залишається лише випадкова похибка.

*Випадкова похибка ЗВ* – це складова похибки вимірювання, яка змінюється випадково при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини.

На засіб вимірювання одночасно діють багато факторів впливу. Змінюючись під впливом оточуючого середовища кожен з них породжує елементарну похибку. Контрольовані фактори (наприклад, температура, положення приладу) створюють похибки, які можна вважати систематичними. Неконтрольовані фактори, яких більшість і значення яких невідомі і випадкові, створюють *випадкову похибку, яка є сумою багатьох елементарних випадкових похибок.*

Отже, випадкова похибка, а також і результат вимірювання, є випадковими величинами. Детермінована величина задана тільки своїм значенням, а випадкова величина задається деяким рядом своїх значень і кожному значенню відповідає ймовірність, з якою випадкова величина може прийняти це значення.

#### **4.2. Закони розподілу ймовірностей випадкових похибок і числові характеристики випадкової похибки. Довірчий інтервал і довірча ймовірність результату вимірювання**

Закон розподілу ймовірностей випадкової величини ставить у відповідність значенню випадкової величини ймовірність цього значення. Закон розподілу може бути заданий у різних формах, а саме:

- у формі таблиці розподілу,

$x_i$	$x_1$	$x_2$	...	$x_n$
$p_i$	$p_1$	$p_2$	...	$p_n$

- у формі багатокутника розподілу або гістограми,

- в аналітичній формі.

У теорії ймовірностей стверджується: якщо випадкова величина є сумою багатьох елементарних випадкових величин, то законом розподілу ймовірностей цієї випадкової величини є закон нормального розподілу – закон Гауса . Закон нормального розподілу ймовірностей, записаний в аналітичній формі має вигляд

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2} \right], \quad (4.1)$$

де  $x$  – випадкова величина;

$f(x)$  – диференціальна функція або густина розподілу ймовірностей  $x$ ;

$m_x$  – математичне сподівання випадкової величини  $x$ ;

$\sigma_x$  – середньоквадратичне відхилення  $x$ .

Графік цієї функції зображений на рис. 4.1.

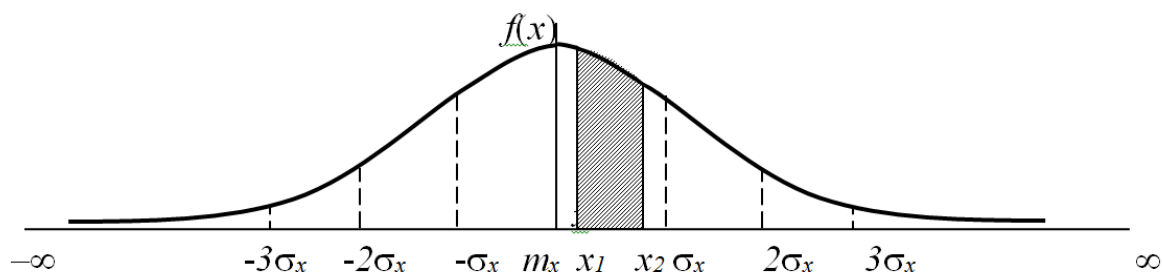


Рис. 4.1. Диференціальна функція нормального розподілу.

Математичний сенс форми запису закону розподілу у вигляді диференціальної функції у тому, що **ймовірність** того, що значення величини  $x$  знаходиться в межах від  $x_1$  до  $x_2$  дорівнює визначеному інтегралу від диференціальної функції розподілу ймовірностей.

$$P(x) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx. \quad (4.2)$$

Досліджено і доведено, що випадкова похибка будь-якого аналогового засобу вимірювання є сумою багатьох елементарних випадкових похибок, створених дією кількох факторів навколишнього середовища. Тому значення результатів вимірювання є величинами випадковими, ймовірності яких розподілені за нормальним законом.

Закон нормального розподілу має дві числові характеристики -  $m_x$  і  $D_x = \sigma_x^2$ . Числова характеристика  $m_x$  носить назву **математичного сподівання** випадкової величини  $x$ , а характеристика  $D_x$  називається **дисперсією** випадкової величини  $x$ .  $\sqrt{D_x} = \sigma_x$  називається **середньоквадратичним відхиленням (СКВ)** величини  $x$ . Доведено, що математичне сподівання є оцінкою найбільш наближеною до істинного значення вимірюваної величини, а дисперсія є характеристикою відхилення виміряних значень від істинного. У

такому разі середньоквадратичне відхилення може бути оцінкою випадкової похибки вимірюваної величини.

Для перервних випадкових величин, якими є результати вимірювань, математичне сподівання обчислюють за формулою середнього арифметичного:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (4.3)$$

Дисперсію і середньоквадратичне відхилення обчислюють за формулами:

$$D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2, \quad (4.4)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}. \quad (4.5)$$

Дисперсія і СКВ характеризують розсіяння значень  $x_i$  випадкової величини  $x$  навколо математичного сподівання  $m_x$ . Якщо  $x_i$  - результати спостережень незмінної випадкової величини, звільнені від систематичних похибок, то  $m_x$  - найбільш ймовірне значення вимірюваної величини, а СКВ характеризує середньоквадратичне значення випадкових похибок даних спостережень. За визначенням закону розподілу площа під кривою на рис.4.1 обмежена значеннями від  $-\sigma_x$  до  $+\sigma_x$  є ймовірністю того, що випадкові величини  $x_i$  знаходяться цьому інтервалі. При нормальному законі розподілу ця ймовірність дорівнює  $P(\sigma) = 0,68$ . Для інтервалу  $\pm 2\sigma_x$  ймовірність  $P(2\sigma) = 0,95$  і для інтервалу  $\pm 3\sigma_x$  ймовірність  $P(3\sigma) = 0,997$ . Інтервал у якому з заданою ймовірністю знаходиться похибка вимірювання, називають **довірчим інтервалом**, а ймовірність, з якою похибка знаходиться у межах цього інтервалу, називають **довірчою ймовірністю**. Отже, при нормальному законі розподілу довірчому інтервалу  $\pm 3\sigma_x$  відповідає довірна ймовірність 0,997. Це означає, що всі можливі випадкові похибки не перевищують по абсолютному значенню  $3\sigma_x$ . Це ствердження називають “правило трьох сигм”. При обробці результатів багатократних спостережень розрізняють середньоквадратичне

відхилення результатів окремих спостережень від математичного сподівання, яке обчислюють за формулою (4.5) і середньоквадратичне відхилення математичного сподівання від істинного значення вимірюваної величини, яке обчислюють за формулою (4.6)

$$\sigma_{m_x} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2} \quad (4.6)$$

В метрології за *результат вимірювання приймають математичне сподівання  $m_x$* , а *точність вимірювання оцінюють шириною довірчого інтервалу  $m_x - \Delta_{\text{макс}} < x < m_x + \Delta_{\text{макс}}$* , в якому з заданою довірчою ймовірністю знаходиться істинне значення вимірюваної величини, де  $\Delta_{\text{макс}}$  - максимальна випадкова похибка математичного сподівання. Ширину довірчого інтервалу вибирають залежно від надійності, якої хочуть надати результату. Результату найвищої надійності відповідає максимальна похибка  $\pm \Delta_{\text{макс}} = \pm 3\sigma_x$  і довірча ймовірність  $P(3\sigma) = 0,997$ . Високу надійність забезпечує довірчий інтервал  $\pm \Delta_{\text{макс}} = \pm 2\sigma_x$  з довірчою ймовірністю  $P(2\sigma) = 0,95$ . При середній надійності можна взяти  $\pm \Delta_{\text{макс}} = \pm 1,65\sigma_x$  з ймовірністю 0,9.

Нормальний закон (НЗ) задовільно описує розподіл ймовірностей випадкових похибок аналогових ЗВ при багатократних спостереженнях. Застосування його базується на двох аксіомах, виведених з досвіду. Перша з них стверджує, що *при великій кількості вимірювань (спостережень) рівні за значенням, але різні за знаком похибки рівновірогідні*. Друга стверджує, що *ймовірність малих похибок більша, ніж великих*. Згідно з цими аксіомами крива закону нормального розподілу повинна бути симетричною відносно осі ординат, густина ймовірності максимальна в точці  $m_x$  і асимптотично прямує до 0 при  $x_i \rightarrow \pm\infty$ . Але співвідношення нормального закону дають істинні оцінки при достатньо великій кількості повторних вимірювань (спостережень). Досвід показав, що оцінки, обчислені за формулами НЗ, збігаються з наближеними до істинних при кількості спостережень не менше 20. При меншому числі спостережень точніші оцінки дає розподіл Стюдента, в якому



співвідношення між довірчим інтервалом і довірчою ймовірністю – коефіцієнт Стюдента залежить від числа спостережень і вибирається з таблиці. Наприклад, при 10 спостереженнях для довірчої ймовірності 0,95 ширина довірчого інтервалу буде  $\pm\Delta_{\text{макс}} = \pm 2,26\sigma_x$ , тобто коефіцієнт Стюдента дорівнює 2,26, а не 2,04, як при нормальному розподілі.

Випадкові похибки цифрових ЗВ розподілені за законом рівномірного розподілу. Диференціальна функція рівномірного розподілу має вигляд

$$f(x) = \frac{1}{x_1 - x_2} = \frac{1}{2\alpha} \text{ при } x_2 < x < x_1. \quad (4.7)$$

$f(x) = 0$  - за межами цього інтервалу

Інтегральна функція рівномірного розподілу має вигляд:

$$F(x) = \int_{a-\alpha}^{a+\alpha} \frac{dx}{2\alpha} = 1. \quad (4.8)$$

Графічне зображення диференціальної функції має вигляд, зображений на рисунку 4.2.

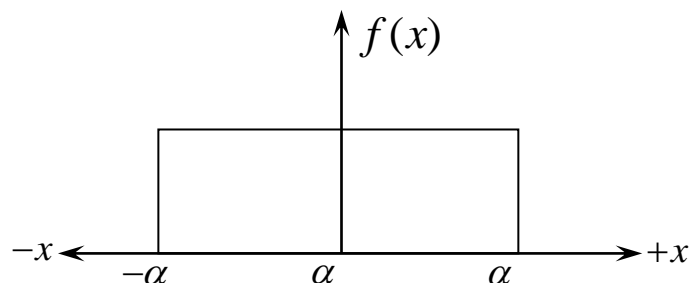


Рис. 4.2. Графічне зображення диференціальної функції рівномірного розподілу

Числові характеристики випадкової величини рівномірного розподілу:

**Математичне сподівання**

$$m_x = a$$

**Дисперсія**

$$\sigma^2 = \alpha^2 / 3 \quad (4.9)$$

**СКВ**

$$\sigma = \alpha / \sqrt{3}$$

За законом рівномірного розподілу розподілені некомпенсовані систематичні похибки, похибки від моменту тертя в осях електромеханічних приладів, похибка дискретності цифрових приладів. У цифрових приладах з вірно вибраним числом розрядів похибка дискретності не перевищує  $\pm 1$  найменшого розряду.

### 4.3. Обробка результатів прямих рівноточних багатократних спостережень. Представлення результату вимірювань.

Якщо вимірювана фізична величина не змінюється, але результати повторних вимірювань відрізняються один від одного, то отримуємо результати з випадковою похибкою. Випадкову похибку можна зменшити проведенням багатократних спостережень. Значення вимірюваної величини, отримане при кожному окремому спостереженні називають *результатом спостереження*, а середнє арифметичне групи (вибірки) результатів – *результатом вимірювання*. Спостереження називають рівноточними, якщо вони виконуються приладами одної точності. Обробку результатів виконують у такій послідовності.

1. Аналізують отримані результати на наявність промахів і грубих похибок. При виявленні їх виключають.

2. Обчислюють систематичні похибки і виключають.

3. Обчислюють математичне сподівання результату вимірювання за формулою (4.3).

4. Обчислюють середньоквадратичне відхилення результатів спостереження за формулою (4.5).

5. Обчислюють середньоквадратичне відхилення результату вимірювання за формулою (4.6).

6. Залежно від потрібної надійності результату обирають довірчу ймовірність з ряду 0,9; 0,95; 0,997

7. Залежно від довірчої ймовірності і числа спостережень з таблиці закону нормального розподілу або розподілу Стьюдента ( якщо  $n < 20$ ) вибирають коефіцієнт  $t$  і за формулою:

$$\Delta_{\text{макс}} = t \cdot \sigma_{m_x}, \quad (4.10)$$

встановлюють довірчий інтервал результату вимірювання:

$$m_x - \Delta_{\text{макс}} < m_x < m_x + \Delta_{\text{макс}}, \quad (4.11)$$

Методи обробки і форма представлення результату вимірювань у нормативних документах регламентовані державним стандартом (ДСТУ ГОСТ 8.207–76). Офіційний результат вимірювання повинен містити значення

вимірюваної величини і характеристики точності цього значення, тобто невиключні систематичні і випадкові похибки. Результат повинен бути записаним у вигляді

$$X = x' \pm \Delta, \quad (4.12)$$

де  $x'$  - математичне сподівання  $m_x$  результату вимірювання при багатократних спостереженнях або результат однократного вимірювання;

$\Delta$  - невиключні систематичні  $\theta$  і випадкові  $\sigma_{x'}$  похибки.

Систематичними похибками можна знехтувати, якщо

$$\frac{\theta}{\sigma_{m_x}} < 0,8. \quad (4.13)$$

Тоді

$$\Delta = t \sigma_{m_x}. \quad (4.14)$$

Якщо

$$\frac{\theta}{\sigma_{m_x}} > 0,8, \quad (4.15)$$

то можна знехтувати випадковою похибкою і прийняти

$$\Delta = \theta. \quad (4.16)$$

У проміжних випадках обчислюють результуючу похибку за формулою

$$\Delta = t_{\Sigma} \cdot \sigma_{\Sigma}, \quad (4.17)$$

де  $t_{\Sigma}$  - коефіцієнт, відповідний композиції законів розподілу випадкових і невиключених залишків систематичних похибок;

$\sigma_{\Sigma}$  - оцінка середньоквадратичного відхилення суми випадкових і невиключених залишків систематичних похибок.

Величину  $\sigma_{\Sigma}$  знаходять згідно формули:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_{m_x}^2}, \quad (4.18)$$

де  $\sigma_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \theta_i^2}$  – оцінка СКВ суми невиключених залишків

систематичної похибки.

Виходячи з того, що невиключені залишки систематичних похибок розподілені за рівномірним законом, коефіцієнт  $t_{\Sigma}$  рекомендують обчислювати за формулою

$$t_{\Sigma} = \frac{t_{x'} \sigma_{m_{x'}} + t_{\theta} \sigma_{\theta}}{\sigma_{m_{x'}} + \sigma_{\theta}}, \quad (4.19)$$

де  $t_{\theta} \sigma_{\theta} = \theta$ .

**Приклад:** форма запису результатів перевірки зразкової міри опору 1000 Ом. При  $n=20$  отримані результати –  $x' = m_{x'} = 1000,56$  Ом;  $\sigma_{m_{x'}} = 0,08$  Ом.

При нормальному законі розподілу ймовірностей випадкових похибок довірчий ймовірності  $P(0,99)$  відповідає довірчий інтервал похибки

$$2,6 \sigma_{m_{x'}} = 2,6 \cdot 0,08 = 0,21 \text{ Ом}$$

Як би повністю були виключені систематичні похибки або невиключена систематична похибка  $\theta$  була менша за  $0,8 \sigma_{m_{x'}}$ , то результат вимірювання ми би записали так:  $R = 1000,56 \pm 0,21$  Ом;  $P(0,99)$ .

У нашому випадку ми користувалися мостом Р 329, клас точності якого 0,05. Згідно класу точності мосту верхня межа допустимої невиключеної систематичної похибки складає 0,05% від значення вимірюваної величини, тобто 0,5 Ом. Отже,

$$\theta / \sigma_{m_{x'}} = 0,5 / 0,08 = 6,25 > 0,8.$$

Умова нехтування систематичною похибкою не виконується, потрібно її врахувати. Результуючу похибку будемо знаходити за формулою

$$\Delta = t_{\Sigma} \cdot \sigma_{\Sigma},$$

де  $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_{m_{x'}}^2}$ ;  $\sigma_{\theta} = \sqrt{\theta^2 / 3} = 0,3$  Ом;

$t_{\Sigma}$  – коефіцієнт, відповідний композиції законів розподілу випадкових і невиключних залишків систематичної похибки;

$$t_{\Sigma} = \frac{2,6 \cdot 0,08 + 0,50}{0,08 + 0,3} = 1,9$$

Отже,  $\Delta = t_{\Sigma} \cdot \sigma_{\Sigma} = 1,9 \sqrt{0,08^2 + 0,3^2} = 1,9 \cdot 0,31 = 0,59$  Ом

Результат записуємо у вигляді:  $R = 1000,56 \pm 0,6$  Ом;  $P(0,99)$

### Контрольні запитання

- 1). Джерела похибок вимірювання, види похибок за їх походженням і властивостями.
- 2). Поясніть причини виникнення випадкових похибок ЗВ.
- 3) Обґрунтуйте правомірність застосування нормального закону розподілу ймовірностей випадкових величин до математичної моделі випадкової похибки ЗВ.
- 4) Диференціальна функція розподілу ймовірностей нормального закону, логічний сенс її характеристик.
- 5) Інтегральна функція нормального розподілу, її логічний сенс.
- 6) Математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення при нормальному законі.
- 7) Довірчий інтервал і довірна ймовірність результату вимірювання
- 8) Зв'язок між довірчим інтервалом і довірчою ймовірністю при нормальному розподілі ймовірностей.
- 9) Зв'язок між довірчим інтервалом і довірчою ймовірністю при розподілі Стюдента.
- 10) Формули середньоквадратичного відхилення математичного сподівання результатів багатократних рівноточних спостережень.
- 11) Обробка результатів прямих рівноточних багатократних спостережень
- 12) Форми запису результату вимірювань у нормативно-технічній документації.
- 13) Закон рівномірного розподілу ймовірностей випадкових похибок

## РОЗДІЛ V. АНАЛОГОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

### 5.1. Поняття про аналогові і цифрові сигнали та вимірювальні прилади

У природі взагалі, і в електричних системах зокрема, більшість фізичних процесів на тривалих інтервалах часу є неперервними у часі. Сигнали інформації про їх стан природно є неперервними за часом і за рівнем, подібними до сигналу, зображеного на рис.5.1.а). Головною ознакою аналогового сигналу є те, що його значення існують у будь-який момент на вибраному інтервалі часу.

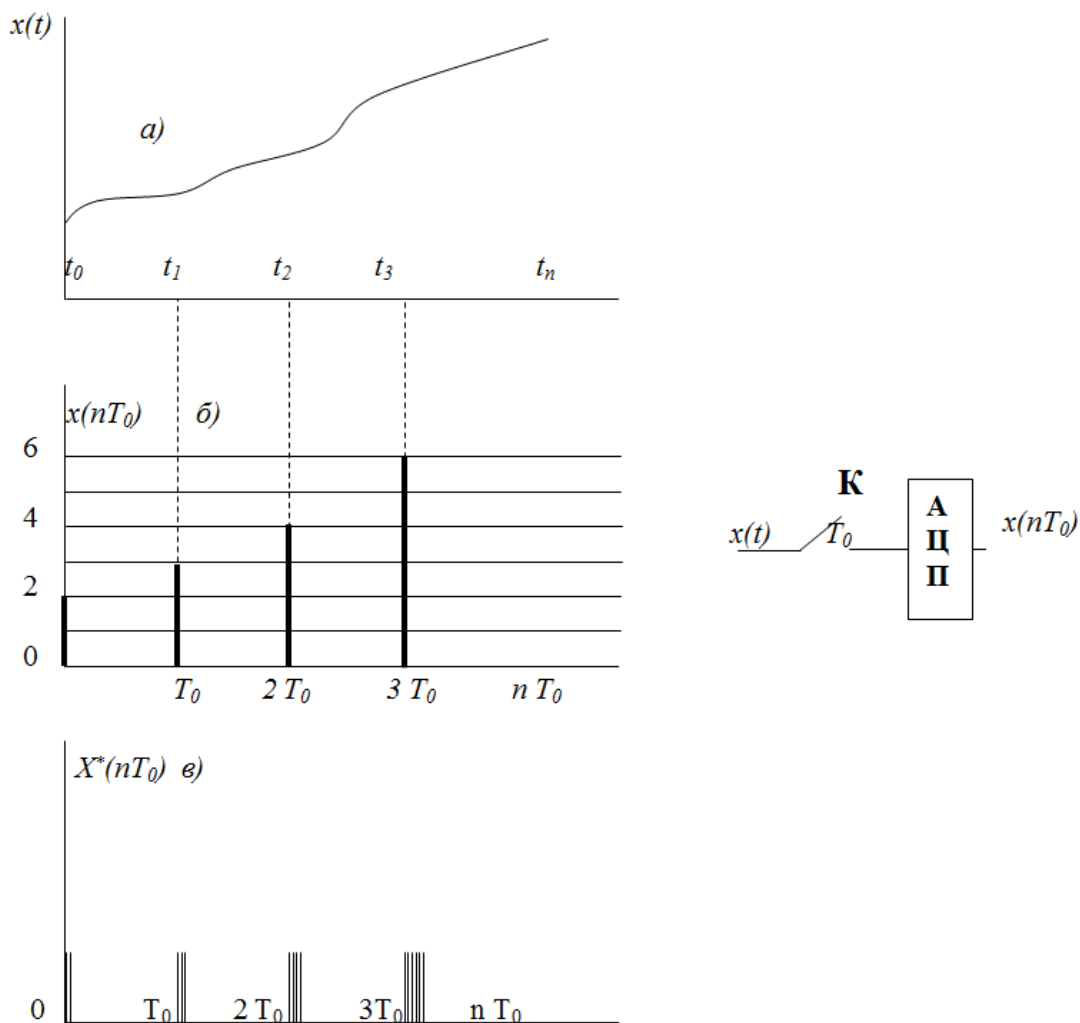


Рис. 5.1. Перетворення неперервного сигналу в дискретний цифровий сигнал

Вимірювальні прилади і перетворювачі, які видають сигнали інформації неперервні за часом і неперервні за рівнем називають **аналоговими**.

Такими приладами є електромеханічні вимірювальні прилади, які широко застосовують для вимірювання фізичних величин.

Прилади і перетворювачі, в яких інформація видається дискретно, через певні проміжки часу сигналами цифрового коду, називають **цифровими**.

Аналоговий сигнал перетворюють у цифровий за допомогою аналого-цифрового перетворювача – **АЦП**. При перетворенні аналогового сигналу у цифровий здійснюються дві форми дискретизації – *дискретизація за часом* і *дискретизація (квантування) за рівнем*. Дискретизація за часом полягає в тому, що неперервний за рівнем і часом сигнал за допомогою ключа К через певні проміжки часу подають на вхід АЦП ( рис. 5.1.б). В АЦП здійснюється квантування сигналу за рівнем. Воно полягає в тому, що весь діапазон зміни рівня сигналу в АЦП представлений визначеним числом найменших порцій (квантів) вимірюваної величини. Квант – це аналог поділки проградуїрованої шкали, у ЦВП це одиниця останнього розряду числа, яким представлено результат. Тому цю операцію називають квантуванням за рівнем. Після неї рівень сигналу в моменти вимірювання  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2 \dots t_n$  буде представлений відповідним числом квантів у одиничному коді, як на рис.5.1 в), а далі у двійково-десятковому коді. Детально принцип роботи АЦП буде розглянуто у розділах XVI-XVII.

## **5.2. Будова і принцип дії електромеханічних вимірювальних приладів**

В електромеханічних вимірювальних приладах електрична енергія вимірюваного струму перетворюється у механічну енергію руху відлікового пристрою. Електромеханічний вимірювальний прилад складається з вимірювального механізму, відлікового пристрою і шкали. Залежно від конструкції вимірювального механізму електромеханічні вимірювальні прилади поділяють на прилади таких систем:

- магнітоелектричної;
- електромагнітної;
- електродинамічної;

- електростатичної;
- індукційної.

### 5.3. Вимірювальні прилади магнітоелектричної системи

Будова вимірювального механізму магнітоелектричної системи зображена на рисунку 5.2. Він складається з таких конструктивних елементів: нерухомого постійного магніту 3, рухомої рамки з обмоткою 1, жорстко закріпленої на осі і відлікового пристрою зі стрілкою і шкалою. Відліковий пристрій показано окремо на рисунку 5.3.

Принцип дії механізму магнітоелектричної системи легко зрозуміти розглянувши рис. 5.4. Він заснований на взаємодії магнітного поля провідника зі струмом з магнітним полем постійного магніту. При взаємодії магнітного поля рамки зі струмом з магнітним полем постійного магніту створюється пара сил  $F$  та  $-F$  і крутний момент, який спонукає рамку, а з нею і вісь, обертатись.

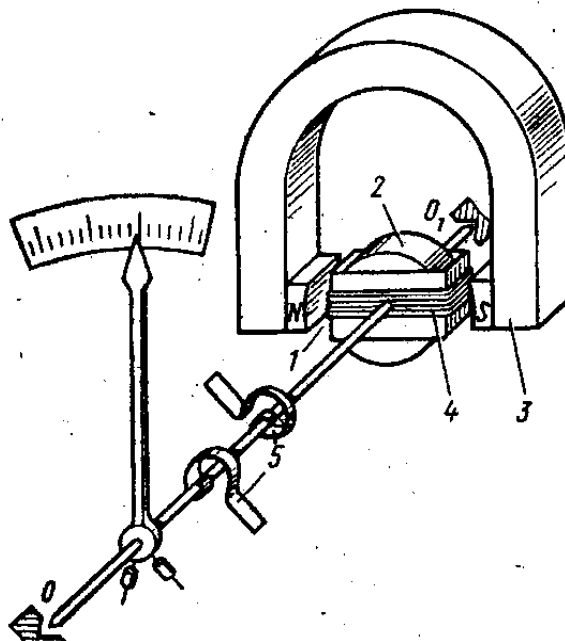


Рис. 5.2. Загальний вигляд вимірювального механізму магнітоелектричної системи: 1-рамка з обмоткою; 2-осердя з магнітом'якої сталі; 3-постійний магніт; 4-обмотка; 5-спіральні пружини з фосфористої бронзи; 0-0<sub>1</sub>-відліковий пристрій



Провідником з вимірюваним струмом є обмотка, намотана на каркасі з алюмінію тонким мідним ізолюваним дротом (діаметр  $\geq 0,05-0,1$  мм). Початок і кінець обмотки припаяні до спіральних пружин, ізолюваних одна від одної і з'єднаних з затискачами, якими прилад вмикається в електричний ланцюг. При протіканні струму через обмотку навколо неї створюється магнітне поле. Згідно закону взаємодії магнітних полів на провідник зі струмом  $I$  діє сила  $F$ , на протилежний провідник обмотки діє сила  $-F$ . Пара сил створює крутний момент  $M_{кр}$ . За законом взаємодії магнітних полів сила

$$F = B I l_1 n \cdot \sin \beta, \quad (5.1)$$

де  $B$  – індукція поля магніту;  $I$  – вимірюваний струм;

$l_1$  - активна довжина провідника рамки;

$n$  - число витків обмотки ;

$\beta$  - кут між векторами індукції і струму.

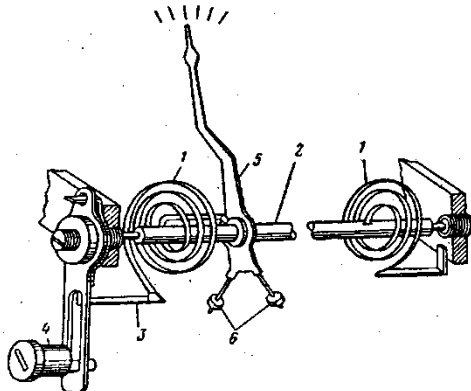


Рис. 5.3. Типова конструкція відлікового пристрою приладів магнітоелектричної системи: 1-спіральні пружини; 2-вісь; 3-поводок коректора; 4-коректор нуля; 5-стрілка; 6-ваги

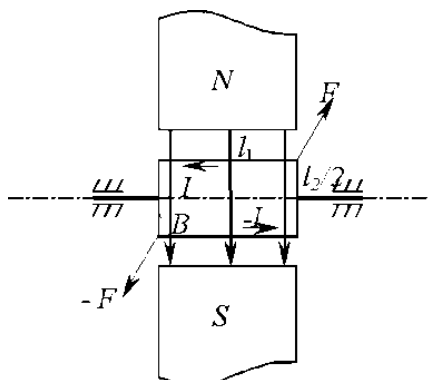


Рисунок 5.4. Взаємодія магнітного поля рамки зі струмом з магнітним полем.

Завдяки осердю, на якому розміщена рамка з обмоткою, вектор магнітного поля у вузькому прощарку між полюсами магніту і осердям, направлений по радіусу осердя, а кут  $\beta$  між векторами струму і індукції дорівнює  $90^\circ$  при будь якому куті  $\alpha$  відхилення рамки, тому  $\sin \beta \approx 1$ .

Отже, крутний момент, який створює пара сил, дорівнює

$$M_{\text{кр}} = F \cdot l_2 = B \cdot I_1 I_2 \cdot n \cdot I = BS n \cdot I \quad (5.2)$$

де  $l_2$  - довжина плеча.

Якби вісь з рамкою не була закріплена на пружинах, то вона б неперервно оберталась, як якір електродвигуна. Для того, щоб вона зупинилась, відхилившись на кут  $\alpha$ , пропорційний вимірюваному струму, необхідно створити протидіючий момент, рівний крутному. Цей момент створюється двома спіральними пружинами, як показано на рис. 5.2 і рис. 5.3. На останньому рисунку показана типова конструкція кріплення стрілки приладу будь якої системи. Протидіючий момент, створений спіральними пружинами, дорівнює

$$M_{\text{пр}} = G \cdot \alpha, \quad (5.3)$$

де  $G$  – коефіцієнт жорсткості пружини або питомий пружний момент пружини.

При рівності моментів

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{пр}}, \quad (5.4)$$

стрілка зупиниться, відхилившись на кут  $\alpha$ , пропорційний вимірюваному струму.

У відповідності до (5.4)

$$BS n I = G \cdot \alpha,$$

або

$$\alpha = \frac{BS n}{G} \cdot I = C \cdot I. \quad (5.5)$$

Величини  $B$ ,  $S$ ,  $n$ ,  $G$  є конструктивно сталими, замінимо їх коефіцієнтом  $C$ .

Отже, шкала магнітоелектричного амперметра є *рівномірною*.

Стрілка з віссю мають природний момент інерції. Тому при її русі до крутного моменту додається інерційний момент і вона проходить за позначку

шкали, відповідну куту  $\alpha$ , здійснює кілька коливань навколо неї і зупиняється. Щоб цих коливань було не більше одного, потрібно підібрати масу стрілки і створити заспокоюючий момент. Для того обмотку рамки намотують на алюмінієвому каркасі. При коливаннях рамки в магнітному полі в каркасі наводиться ЕРС, від якої протікає вихровий струм і створюється протидіючий момент, який гасить ці коливання. Для прискорення цього процесу збільшують момент інерції стрілки за допомогою ваг 6 (рис.5.3) Основна похибка приладів магнітоелектричної системи визначається тертям в опорах рухомої частини, неточністю градування шкали та неточністю компенсації температурної нестабільності опору обмотки рамки.

Величини  $S$  і  $n$  є конструктивними сталими, а величини  $B$ ,  $G$  і опір обмотки рамки змінюються при зміні температури навколишнього середовища. Тому похибки вимірювання приладами магнітоелектричної системи залежать від температури навколишнього середовища. Для їх зменшення у вимірювальних механізмах застосовують температурно стабільні матеріали і вимірювальні схеми з температурною компенсацією похибки. Похибки вольтметра зменшують вмиканням послідовно з обмоткою рамки термочутливих резисторів. Вимірювані струми через рамки магнітоелектричних приладів не повинні нагрівати обмотку, вісь і пружини, через які ці струми вводяться. Тому ці струми обмежуються десятком міліампер. При безпосередньому вимірюванні струму пряме вмикання цих приладів можливе тільки в коло з малим струмом. Для розширення меж вимірювання магнітоелектричних амперметрів застосовують шунти і давачі Холла, а для розширення меж вимірювання вольтметрів – додаткові резистори. Прилади магнітоелектричної системи застосовують для вимірювання струму і напруги в колах постійного струму. Вимірювальні механізми вольтметрів не відрізняються від механізмів амперметрів. Різниця в тому, що вольтметр вмикається паралельно до електричного кола з напругою, а амперметр – послідовно в коло з вимірюваним струмом. Тому опір вольтметра повинен бути як найбільшим, в багато разів більшим внутрішнього опору вимірюваного кола, а опір амперметра – в багато разів менший.

#### 5.4. Вимірювальні прилади електромагнітної системи

Типова конструкція вимірювального механізму електромагнітної системи зображена на рис. 5.5. Нерухомою частиною цього механізму є котушка 1 з обмоткою на каркасі з ізоляційного матеріалу. Рухомою частиною є пластина 2 з магнітом'якої сталі, закріплена на осі зі стрілкою. При проходженні змінного струму через обмотку нерухомої котушки навколо неї створюється магнітне поле, яке в короткозамкненій пластині за законом електромагнітної індукції наводить ЕРС. Від неї у пластині виникає вихровий струм, навколо якого створюється магнітне поле. Магнітне поле котушки при взаємодії з полем пластини створює втягуючу або виштовхуючу силу і відповідний крутний момент  $M_{кр}$ . Протидіючий момент  $M_{пр}$  створюється спіральними пружинами. При рівності моментів  $M_{кр} = M_{пр}$  стрілка зупиняється. Коливання стрілки зменшують за допомогою пневматичного демпфера – поршня в циліндрі, зображеного на рис. 5.5. Виготовляються також прилади електромагнітної системи інших конструкцій, зображених на рис. 5.6.

Як відомо з електротехніки, енергія котушки зі струмом дорівнює

$$W = \frac{1}{2} I^2 L.$$

При втягуванні або виштовхуванні пластини вісь обертається на кут  $\Delta\alpha$ , індуктивність котушки змінюється на величину  $\Delta L$ . Крутний момент

$$M_{кр} = \frac{dW}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 dL / d\alpha,$$

протидіючий момент  $M_{п\delta} = G \alpha$ .

Рівняння характеристики шкали отримаємо з рівняння рівності моментів (5.4).

$$\alpha = \frac{1}{2G} \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2 \quad (5.6)$$

Рівняння показує, що шкала приладу електромагнітної системи нерівномірна. Конструктивним методом вдається отримати шкалу практично рівномірну з 20 – 25% до 100% шкали. Джерелом похибок є вплив зовнішніх магнітних полів і нерівномірність градування шкали. Для зменшення похибок від впливу зовнішніх магнітних полів механізми електромагнітної системи

розміщують в екранованих корпусах або застосовують астатично захищені конструкції вимірювальних механізмів. Переваги цих приладів – проста конструкція, висока перевантажувальна здатність і висока надійність. Амперметри і вольтметри електромагнітної системи масово використовують як робочі щитові прилади з класом точності 1,5 і 2,0 в електроустановках однофазного і трифазного струму напругою до 1000 і більше 1000 В.

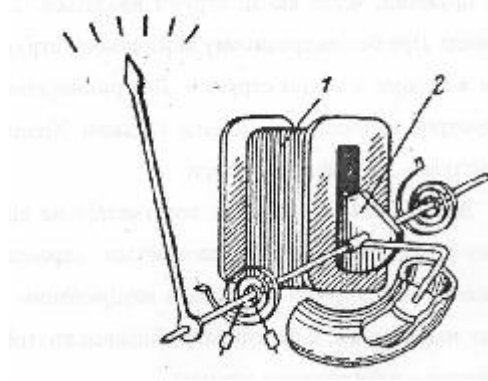


Рис. 5.5. Загальний вигляд вимірювального механізму електромагнітної системи.

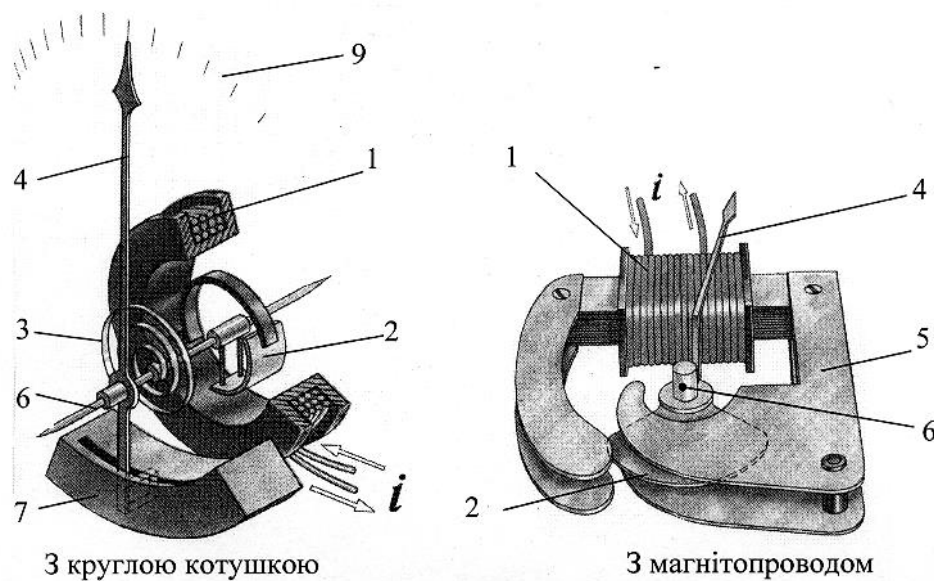


Рис. 5.6. Загальний вигляд вимірювальних механізмів електромагнітної системи інших конструкцій: 1-нерухома котушка; 2-рухома пластина

### 5.5. Вимірювальні прилади електродинамічної системи

Типова конструкція вимірювального механізму електродинамічної системи зображена на рис. 5.7. Вимірювальний механізм електродинамічної системи складається з нерухомої котушки 2, розділеної на дві половини і рухомої котушки 3, закріпленої на осі між двома половинами нерухомої. При

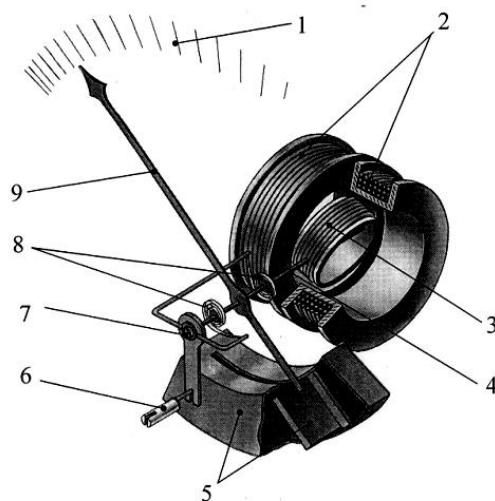
протіканні через котушки струмів  $i_1$  та  $i_2$  навколо них створюються магнітні поля, які взаємодіючи між собою, створюють крутний момент, що обертає рухома котушка, а з нею і стрілку. Протидіючий момент, створюваний спіральними пружинами, зупиняє котушку на відповідній поділці шкали приладу. Математична модель процесу взаємодії магнітних полів має вигляд

$$M_{\hat{e}\delta} = \frac{dW}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \left( \frac{1}{2} Li_1^2 + \frac{1}{2} Li_2^2 + Mi_1 i_2 \right) = \frac{d}{d\alpha} Mi_1 i_2.$$

$$\frac{dL_1}{d\alpha} = \frac{dL_2}{d\alpha} = 0$$

На постійному струмі маємо

$$M_{\hat{e}\delta} = \frac{d}{d\alpha} M_{12} \cdot I_1 I_2; \quad (5.7)$$



- |                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| 1 – шкала;                 | 6 – коректор нуля;              |
| 2 – нерухомі котушки;      | 7 – підп'ятник;                 |
| 3 – рухома котушка;        | 8 – моментні спіральні пружини- |
| 4 – вісь;                  | струмовідводи;                  |
| 5 – повітряний заспокоювач | 9 – стрілка.                    |

Рис. 5.7. Типова конструкція вимірювального механізму електродинамічної системи

На змінному струмі

$$M_{кр} = \frac{d}{d\alpha} M_{12} \cdot I_1 I_2 \cos\varphi, \quad (5.8)$$

де  $M_{12}$  - взаємна індуктивність котушок;

$\varphi$  - кут зсуву фаз між струмами.

Протидіючий момент, створений пружинами відповідно (5.3). При рівності моментів отримуємо рівняння характеристики у загальному вигляді

$$\alpha = \frac{1}{G} \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2 \cos\varphi, \quad (5.9)$$

Електродинамічні вимірювальні прилади виготовляють як амперметри і вольтметри змінного і постійного струму, але найчастіше їх використовують як ватметри. Розглянемо схеми їх вмикання як амперметрів, вольтметрів і ватметрів, зображені на рис.5.8.

- 1) Амперметр малих струмів, рис.5.8. а). Катушки з'єднують послідовно, при тому

$$I_1 = I_2 = I_x;$$

$$\alpha = \frac{1}{G} \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cdot I_x I_x$$

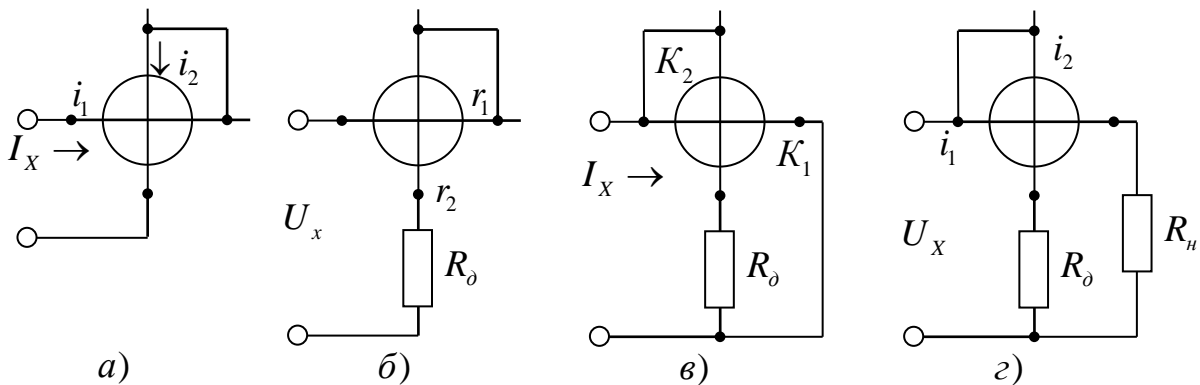


Рисунок 5.8. Схеми приладів електродинамічної системи

Форму і конструкцію катушок підбирають такою, щоб у робочій частині

шкали виконувалась умова  $\frac{dM_{12}}{d\alpha} I_x = const$ . При тому

$$\alpha = C \cdot I_x, \quad (5.10)$$

Тоді отримуємо шкалу в Амперах в робочій частині практично рівномірну.

- 2) Амперметр більших струмів (рис. 5.8, в). Катушки з'єднують паралельно, при цьому

$$I_x = i_1 + i_2;$$

$$i_1 = \kappa_1 I_x; \quad i_2 = \kappa_2 I_x$$

$$i_1 \cdot i_2 = \kappa_1 \cdot \kappa_2 I_x^2;$$

Отже

$$\alpha = \kappa_1 \kappa_2 c \cdot I_x = \kappa \cdot I_x, \quad (5.11)$$

отримуємо шкалу в А в робочій частині практично рівномірну.

3) Вольтметр, рис.3.8.б) обмотки і додатковий резистор  $R_\partial$  з'єднують послідовно. Якщо,

$$R_\partial \gg r_1 + r_2, \text{ то } i_1 = i_2 = \frac{U_x}{R_\partial};$$

$$\alpha = \frac{c}{GR_d} \cdot U_x = \kappa U_x, \quad (5.12)$$

отримуємо шкалу у Вольтах в робочій частині практично рівномірну.

4) Ватметр, обмотки вмикаємо за схемою (рис.5.8, з).

У цьому випадку  $i_1 = i_n$  - струм навантаження;

$$i_2 = \frac{U_x}{R_\partial + r_2};$$

$$\alpha = \frac{1}{GR_d} \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} i_n \cdot U_n = C \cdot P_n. \quad (5.13)$$

Отримуємо шкалу у ватах.

У відповідності до схеми ватметри мають по дві пари затискачів: одна пара – струмові, друга пара – затискачі напруги. Один з струмових і один з затискачів напруги позначені зірочками \*. Їх називають генераторними, до них приєднані початки обмоток. Для вірного відхилення стрілки ватметра (по шкалі від 0 до верхньої поділки) генераторні затискачі потрібно з'єднати разом і приєднувати до одного з затискачів електроприймача.

Електродинамічні ватметри, а також амперметри і вольтметри - це прилади високих класів точності (0,2 – 0,5). Їх використовують в лабораторіях для точних вимірювань, а також як зразкові прилади при повірці робочих приладів нижчих класів точності.



## 5.6. Вимірювальні прилади феродинамічної системи

За принципом дії прилади феродинамічної системи подібні до приладів електродинамічної системи, а за конструкцією – до приладів магнітоелектричної системи. Конструктивною відмінністю феродинамічного приладу від магнітоелектричного є те що його рухома котушка – рамка, розміщена між полюсами не постійного магніта, а між полюсами електромагніта, який намагнічується струмом нерухомої котушки.

При протіканні через котушки струмів  $i_1$  та  $i_2$  навколо них створюються магнітні поля, які взаємодіючи між собою, створюють крутний момент, що обертає рухома котушка, а з нею і стрілку.

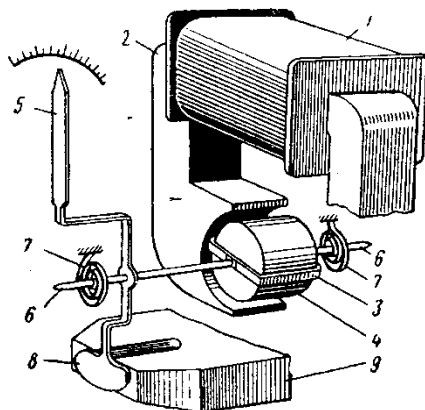


Рис. 5.9. Загальний вигляд конструкції вимірювального механізму феродинамічної системи: 1-нерухома котушка; 2-осердя з полюсами; 3-рамка; 4-осердя; 5-стрілка; 6-вісь; 7-пружина; 8-заспокоювач; 9-магніт заспокоювача

Рівняння крутного моменту має вигляд формул (5.7) і (5.8). Тому рівняння шкали феродинамічного амперметра буде мати вигляд

$$\alpha = \frac{1}{G} \cdot \frac{dM}{d\alpha} I^2, \quad (5.14)$$

а рівняння шкали феродинамічного вольтметра

$$\alpha = \frac{1}{GR_n^2} \cdot \frac{dM}{d\alpha} U^2. \quad (5.15)$$

Сталеві осердя магнітопроводів у феродинамічних приладах підсилюють власні магнітні потоки механізму, збільшують крутний момент і чутливість порівняно з механізмами електродинамічної системи, але й одночасно

збільшують похибки. Тому ці прилади виготовляють з класом точності не вище 1.0 і раніше їх широко застосовували на літаках.

### 5.7. Вимірювальні прилади електростатичної системи

Загальний вигляд вимірювального механізму електростатичної системи зображено на рис. 5.12. Принцип дії електростатичного механізму заснований на механічній взаємодії електрично заряджених пластин. Енергія електричного поля заряджених пластин при постійній напрузі дорівнює

$$W_E = \frac{1}{2} U^2 C$$

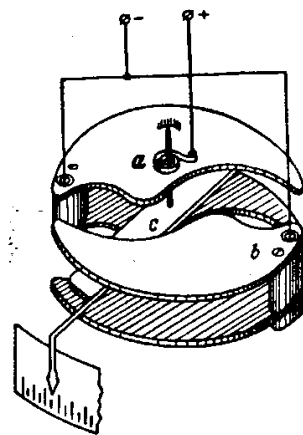


Рис. 5.12. Загальний вигляд вимірювального механізму електростатичної системи

Ця енергія при  $U = const$  може змінюватись тільки при зміні ємності  $C$ . Отже, принцип дії електростатичного приладу можна реалізувати змінюючи ємність активною площею пластин або відстанню між ними. У конструкції зображеній на рис. 5.12, при приєднанні на затискачі напруги постійного струму рухома пластина  $c$  заряджена позитивно, а нерухомі пластини  $a$  і  $b$  негативно. Взаємодіючи між собою, вони створюють крутний момент

$$M_{кр} = \frac{dW}{d\alpha} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \quad (5.16)$$

Протидіючий момент створюється пружинами або масою рухомої пластини. В обох випадках питомий протидіючий момент  $G$  є постійним. Тоді рівняння шкали має вигляд

$$\alpha = \frac{1}{2G} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \quad (5.17)$$

Формула вірна для напруги постійного струму і діючого значення синусоїдної напруги. Загашення коливань стрілки здійснюється магнітоіндукційним способом. Прилади електростатичної системи виготовляють і використовують тільки як вольтметри. Поріг чутливості електростатичних вольтметрів – 3-5 В, діапазон вимірювання – 300 і більше В, клас точності – 1,5. Перевагою електростатичних вольтметрів є можливість вимірювання напруги змінного струму високих частот – від 0 до 40 МГц.

### Контрольні запитання

- 1) Основна ознака аналогового сигналу і аналогового приладу.
- 2) Сила взаємодії провідника зі струмом з магнітним полем постійного магніту.
- 3) Конструкція вимірювального механізму магнітоелектричної системи.
- 4) Градувальна характеристика приладів магнітоелектричної системи.
- 5) Як гасять коливання стрілки в механізмі магнітоелектричної системи ?
- 6) Чому верхня межа діапазону вимірювання амперметрів магнітоелектричної системи обмежена 100...200 мА ?
- 7) Які закони електромагнетизму реалізуються у приладах електромагнітної системи?
- 8) Конструкція і градувальна характеристика приладів електромагнітної системи.
- 9) Конструкція приладів електродинамічної системи.
- 10) Електродинамічні амперметри.
- 11) Електродинамічний вольтметр.
- 12) Електродинамічний ватметр.
- 13) Вимірювальні прилади феродинамічної системи
- 14) Вимірювальні прилади електростатичної системи.
- 15) Аналіз рівняння градувальної характеристики на виявлення факторів похибок.

## РОЗДІЛ VI. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ІНДУКЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

### 6.1. Однофазний індукційний лічильник електричної енергії

До приладів індукційної системи належать індукційні лічильники енергії. Загальний вигляд конструкції вимірювального механізму індукційного лічильника зображено на рис.6.1. Лічильник складається з елементів, перелічених під його зображенням.

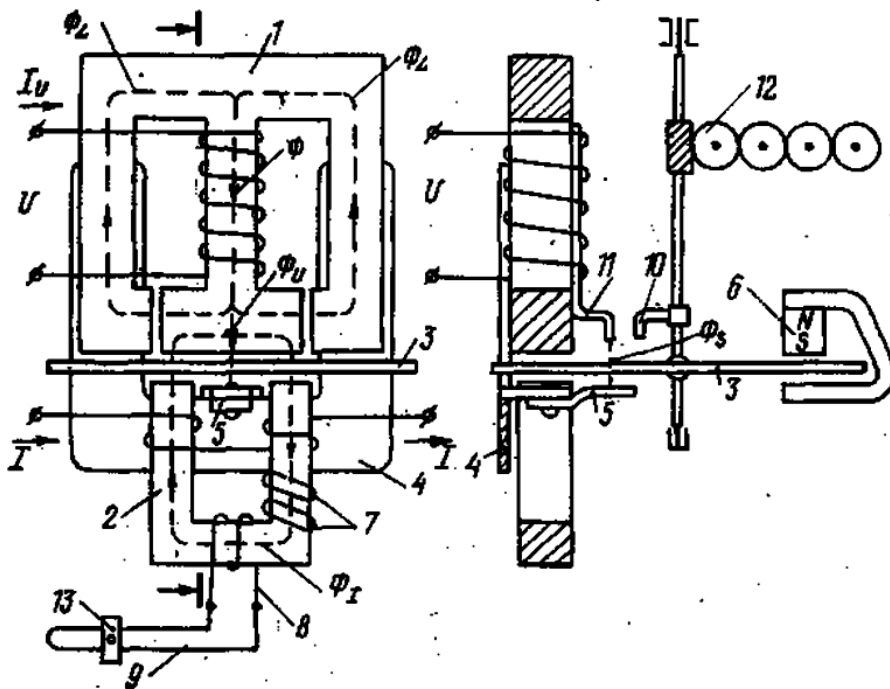


Рис. 6.1. Загальний вигляд конструкції вимірювального механізму індукційного лічильника:

1-Ш-подібне осердя з обмоткою напруги; 2-U-подібне осердя з обмоткою струму; 3-алюмінієвий диск на осі; 4-пластина-протиополус; 5-поводок для створення компенсаційного моменту; 6-постійний магніт для створення гальмівного моменту; 7-короткозамкнені витки; 8-обмотка з регульованим дротяним резистором 9; 10-крючок; 11-пластина з прапорцем з магнітом'якої сталі; 12-відліковий механізм.

Напруга  $U$ , прикладена до обмотки напруги лічильника, створює в обмотці струм  $I_U$  який відстає за фазою від напруги на кут приблизно рівний  $90^\circ$  через великий реактивний опір обмотки. Струм  $I_U$  створює магнітний потік  $\Phi$ , який у магнітопроводі 1 ділиться на два потоки –  $\Phi_U$  і  $\Phi_L$ . Робочий потік

$\Phi_U$  пронизує диск і замикається через протиполіус 4. Неробочий потік  $\Phi_L$  замикається через бокові стержні магнітопроводу. Потіки  $\Phi_U$  і  $\Phi_L$  відстають від струму на кути втрат  $\alpha_U$  і  $\alpha_L$ . При цьому  $\alpha_U > \alpha_L$ , оскільки  $\Phi_U$  пронизує диск і протиполіус, де виникають втрати. Струм  $I$  створює в магнітопроводі магнітний потік  $\Phi_I$ , який пронизує диск і замикається через нижню частину осердя 1. При цьому потік  $\Phi_I$  пронизує диск двічі і відстає від струму на кут  $\alpha_2$ , спричинений втратами на гістерезис та вихрові струми. Таким чином, диск пронизують три потоки, які неспівпадають у просторі і зсунуті за фазою. Взаємодія цих потоків з наведеними ними ж струмами створює крутний момент

$$\dot{I}_{\epsilon\delta} = \hat{e}' f \cdot \Phi_U \cdot \hat{O}_2 \sin\phi, \quad (6.1)$$

де  $f$  – частота струму;

$\phi$  – кут зсуву фази між потоками.

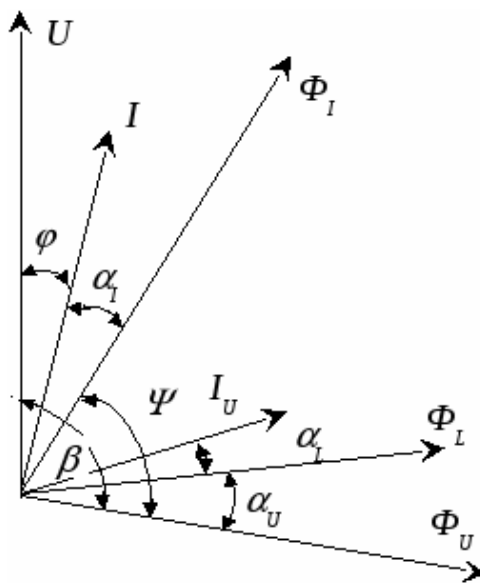


Рисунок 6.2. Векторна діаграма напруги, струмів і магнітних потоків лічильника

При роботі на лінійній ділянці кривої намагнічування магнітопроводу магнітний потік пропорційний струму в обмотці.

$$\Phi_I = \kappa_1 I; \Phi_U = \kappa_2 I_U = \kappa_2 U / Z_U = \frac{\kappa_3 U}{f},$$

де  $Z_U$  – повний опір обмотки напруги. Обмотку виконують так, що індуктивний опір у багато разів більший за активний.

Тоді

$$Z_U \approx X_U = 2\pi \cdot f L_U,$$

$$\Phi_U = \kappa_3 \frac{U}{f}.$$

Підставимо значення  $\Phi_U$  і  $\hat{O}_2$  в (6.1) і отримаємо:

$$M_{кр} = \kappa U I \sin \phi, \quad (6.2)$$

де  $\kappa = \kappa_1 \kappa_2$ .

Щоб крутний момент лічильника був пропорційний активній потужності необхідно виконання умови

$$\sin \phi = \cos \varphi. \quad (6.3)$$

З векторної діаграми видно, що кут  $\phi$  між потоками  $\Phi_I$  і  $\Phi_U$  дорівнює:

$$\phi = \beta - \varphi - \alpha_I.$$

Для виконання умови (6.3) необхідно конструктивно забезпечити щоб,

$$\beta - \alpha_I = 90^\circ \text{ або } \beta > 90^\circ$$

Виконання останніх умов забезпечується створенням великого неробочого потоку  $\Phi_L > \Phi_U$ . Забезпечення рівності  $\beta - \alpha_I = 90^\circ$  здійснюють регулюванням кута втрат в обмотці струму  $\alpha_I$  за допомогою короткозамкнених витків **7** (грубе регулювання) і додаткової обмотки **8**, замкненої на регульований дротяний резистор **13** (плавне регулювання). Після регулювання умова (6.3) забезпечується, а (6.2) можна записати у вигляді

$$M_{кр} = \kappa U I \cos \varphi = \kappa P, \quad (6.4)$$

Для того, щоб диск обертався зі швидкістю, пропорційною навантаженню, необхідно створити гальмівний момент. Цей момент створюється за допомогою постійного магніту **6**. При руху диска між полюсами

магніту в диску наводиться ЕРС, а від неї – вихрові струми, пропорційні потоку і швидкості обертання  $I_M = c_1 \Phi_M \frac{d\alpha}{dt}$ . Навколо вихрових струмів створюється магнітне поле, а від взаємодії магнітного поля диска з полем постійного магніту створюється гальмівний момент

$$M_{\Gamma} = c_2 \Phi_M I_M = c_1 c_2 \Phi_M^2 \frac{d\alpha}{dt} = c_3 \frac{d\alpha}{dt}, \quad (6.5)$$

де -  $c_3 = c_1 \cdot c_2 \cdot \Phi_M^2$ ;  $\alpha$  - кут обертання диска.

При відсутності тертя і при рівності моментів  $M_{кр} = M_{г}$  диск буде

обертатися з усталеною швидкістю, пропорційною активній потужності навантаження. Рівняння балансу моментів буде мати вигляд

$$kP = c_3 \frac{d\alpha}{dt} \text{ або } kP dt = c_3 d\alpha, \quad (6.6)$$

Проінтегруємо у часі від  $t_1$  до  $t_2$  ліву і праву частини і отримаємо:

$$k \int_{t_1}^{t_2} P dt = c_3 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\alpha, \quad (6.7)$$

де  $\int_{t_1}^{t_2} P dt = P(t_2 - t_1) = P \cdot \Delta t = W$  - енергія, спожита за проміжок часу  $\Delta t$ ;

$\frac{c_3}{k} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\alpha = \frac{c_3}{k} (\alpha_2 - \alpha_1) = \frac{c_3}{k} 2\pi N = c \cdot N$  - кут в радіанах, накручений диском

за цей проміжок часу;

$N$  – число обертів за цей проміжок часу.

Метрологічною характеристикою лічильника є його *передаточне число* – кількість обертів за 1кВт/годину спожитої енергії. Передаточне число лічильника вказується на його щитку: «1 кВт/год =  $N_0$  обертів диска».

Величина, обернена передаточному числу, позначається як  $C_1$  і називається *номінальною сталою* лічильника. Вона дорівнює кількості електроенергії, відрахованої лічильником за 1 оберт.

$$C_H = \frac{3600 \cdot 1000}{N_0} \left[ \frac{Вт \cdot с}{оберт} \right] \text{ і тоді } W = C_H \cdot N, \quad (6.7)$$

Дійсне значення енергії за 1 оберт диска в загальному випадку відрізняється від номінальної сталої  $C_H$ . Дійсна стала лічильника визначається при повірці лічильника вимірюванням потужності і проміжку часу, за який диск зробить  $N$  обертів зразковими приладами. При цьому:

$$C = \frac{P \cdot \Delta t}{N}, \quad (6.8)$$

Похибку лічильника знаходять як різницю між номінальною і дійсною сталими:

$$\delta\% = \frac{C_H - C}{C} \cdot 100. \quad (6.9)$$

Похибки лічильника залежать від кількох факторів – від тертя в опорах осі, робочої точки на кривій намагнічування магнітопроводів (визначається струмом навантаження), температури навколишнього середовища, частоти струму. Найбільша складова похибки від тертя в опорах. Але вона піддається зменшенню конструктивним методом. Компенсація похибки від моменту тертя здійснюється створенням додаткового компенсаційного моменту. Компенсаційний момент створюють за допомогою сталевого повідка **5** і прапорця **11**. Частина потоку  $\Phi_U$  проходить через поводок **5**, диск і прапорець **11** і створює додатковий крутний момент, який регулюється положенням повідка. При невідрегульованому компенсаційному моменті диск може обертатися неперервно навіть при відсутності навантаження. Таке явище називають *самоходом* лічильника. Для усунення самоходу на осі диска закріплено крючок **10**. При самоході крючок **10** доходить до повідка **11**, магнітно з ним зчіплюється і зупиняється. В залежності від класу точності струм зрушення диска складає від **0,5%** до **1,5%** номінального струму навантаження. Похибка лічильника змінюється при зміні навантаження. Залежність похибки лічильника від струму навантаження відображується навантажувальною кривою, яка в загальному вигляді наведена на рис. 6.3.



На навантажувальній кривій можна виділити чотири зони. У зоні I похибка додатна, компенсаційний момент більший за момент тертя, швидкість обертання диска більша необхідної. У зоні II у зв'язку зі зростанням навантаження і швидкості обертання диска зростає момент тертя і компенсаційний момент стає меншим необхідного, похибка стає від'ємною. Рівність компенсаційного моменту тертя, при якій  $\delta = 0$  має місце при струмі навантаження приблизно рівному 10% від номінального. В зоні III зростання

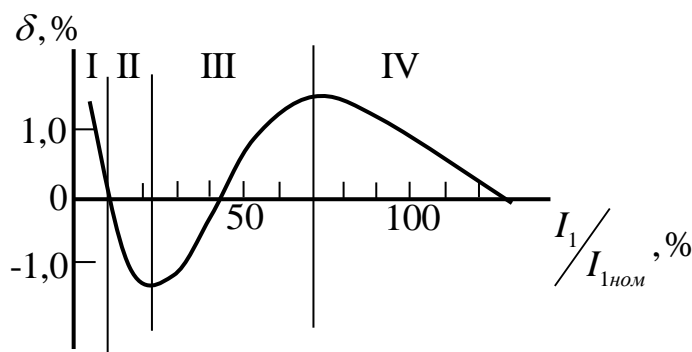


Рис. 6.3. Навантажувальна крива однофазного індукційного лічильника

похибки зумовлене нелінійною залежністю магнітного потоку  $\Phi_I$  від струму  $I$  на початку кривої намагнічування. В зоні IV відбувається зменшення швидкості диска з-за зростання гальмівного моменту.

Клас точності лічильника встановлюють по відносній похибці за формулою (6.9). При такому нормуванні похибки клас точності лічильника не залежить від положення на шкалі результату вимірювання – на початку шкали (біля 0) чи в кінці (біля 100%). Заводи виготовляють індукційні лічильники активної потужності з класом точності **2,5; 2,0** і електронні з класом точності **1,0** та індукційні лічильники реактивної потужності з класом точності **4,0; 2,5** і **2,0**. Індукційний лічильник є не простим вимірювальним приладом, який показує поточне значення вимірюваної величини – потужності, а він є аналоговим обчислювальним приладом. Він обчислює інтеграл за часом, тобто суму миттєвих значень потужності за елементарно малі проміжки часу. Такі прилади називають *інтегруючими*.

**Лічильники енергії трифазного струму.** Для обліку активної енергії у трифазних трипровідних мережах змінного струму використовують

двоелементні лічильники індукційної системи. У наступному розділі буде показано, що у трифазній лінії виконується умова

$$P_{\Sigma} = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3}U_{л} I_{\phi} \cdot \cos\varphi.$$

Це дозволяє вимірювати потужність у трифазних колах методом двох ватметрів, а енергію – двоелементним лічильником. Триелементні лічильники використовують для обліку активної і реактивної енергії у трифазних чотирипровідних мережах, а також для обліку реактивної енергії у трифазних трипровідних мережах. Як у двоелементних, так і в триелементних лічильниках, диски обертових елементів закріплюються на одній осі. Це дозволяє отримати на одній осі обертовий момент рівний алгебраїчній сумі моментів двох або трьох елементів і швидкість обертання осі, яка пропорційна сумі потужностей. Таким чином, незалежно від числа елементів, в лічильниках встановлюється один лічильний механізм. Схематично конструктивне виконання лічильників зображено на рис. 6.4.

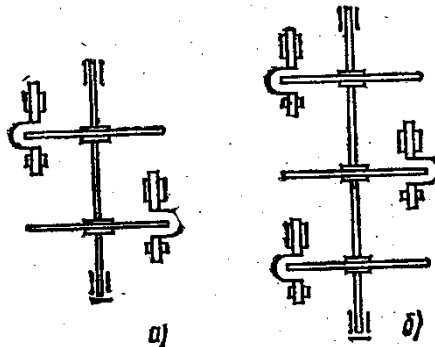


Рис.6.4. Конструктивне виконання трифазних лічильників.

а) двоелементний; б) триелементний

Для дво- і триелементних лічильників запроваджено такі позначення:

**СА3** – лічильник для обліку активної енергії у трифазній трипровідній мережі;

**СА4** – лічильник для обліку активної енергії у трифазній чотирипровідній мережі;

**СР4** – лічильник для обліку реактивної енергії у трифазній трипровідній і чотирипровідній мережі.

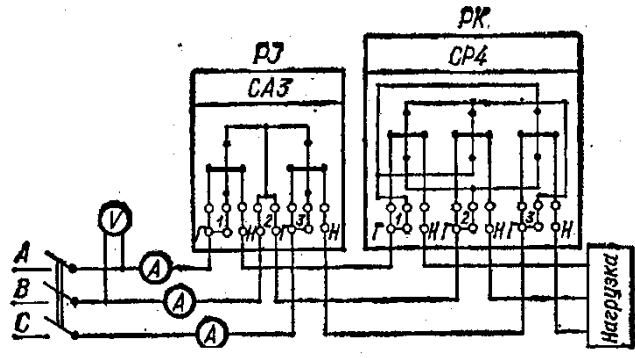


Рис. 6.5. Схеми ввімкнення в лінію трифазних лічильників СА3 та СР4

## 6.2. Ідентифікація електромеханічних вимірювальних приладів

При широкій номенклатурі електромеханічних вимірювальних приладів, які виготовлялися приладобудівними заводами для різних умов експлуатації необхідно було створити і впровадити уніфіковану систему їх паспортизації, таку, яка б відображала на панелі приладу поруч зі шкалою його призначення, основні характеристики і умови експлуатації. Для прикладу на рис. 6.6 зображена панель амперметра, на якій, крім шкали, розміщена основні метрологічні характеристики цього приладу.

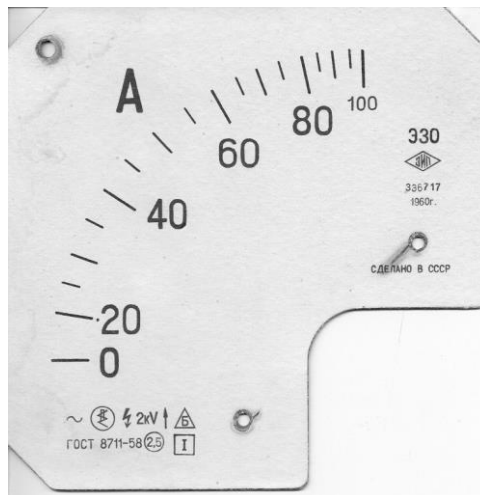


Рис. 6.6. Шкала амперметра

A – одиниці фізичної величини; Э30 – прилад електромагнітної системи серії 30; ↑ - застосовувати у вертикальному положенні; 2 кV – напруга пробою ізоляції корпуса; 2,5 – клас точності; ~ – для змінного струму.

Символи, що використовують для ідентифікації електромеханічних вимірювальних приладів

Таблиця 6.1.

	Увага! Необхідно ознайомитись з додатковими вказівками, наведеними в паспорті приладу			Додатковий опір	
0,02 Ом 0,005 мН	Номінальний активний опір та індуктивність послідовного кола приладів			Прилад магнітоелектричної системи з випрямлячем	
	Вертикальне	Робоче положення шкали приладу	A	Для закритих сухих опалюваних приміщень	Захист від впливу зовнішнього середовища
	Горизонтальне		B	Для закритих сухих не опалюваних приміщень	
	Похиłe, нахил 60°		B	Для польових і морських умов та рухомих установок	
	Захист від зовнішніх магнітних полів	Захист від дії зовнішнього поля	T	Для умов сухого і вологого тропічного клімату	
	Захист від зовнішніх електричних полів			Коректор нуля	
ast	Астатичний прилад	Встановлення приладу	1,5	Від діапазону вимірювання по шкалі	Позначення класу точності (значення основної похибки в відсотках)
Fe	На щиті з сталі будь-якої товщини		1,5 	Від довжини шкали	
Fe5	На щиті з сталі товщиною 5 мм			Від вимірюваного дійсного значення	
NFe	На не сталевому щиті будь-якої товщини			Небезпека дотику до приладу	
Fe*NFe	На щиті будь-якої товщини			Захисна ізоляція	
TT $\frac{100}{5}$	Шкала градуїрована з трансформатором струму 100 А на 5 А	ТН $\frac{3000}{100}$	Шкала градуїрована з трансформатором напруги 3000 В на 100 В		
НШ 75 мВ	застосовувати з зовнішнім шунтом на 75 мВ	•	Означає початок чи кінець робочої частини шкали		

## Контрольні запитання

- 1) Векторна діаграма напруги, струму і магнітних потоків індукційного лічильника.
- 2) Створення крутного моменту диска і його вираз.
- 3) Створення гальмівного моменту диска.
- 4) Рівняння балансу моментів і функції перетворення.
- 5) Фактори, що впливають на похибку лічильника та їх корекція.
- 6) Аналіз навантажувальної кривої лічильника, регулювання самоходу і чутливості
- 7) Передаточне число і номінальна стала лічильника
- 8) Похибка і клас точності лічильника.
- 9) Символи, за якими визначають електромеханічну систему приладу.

## РОЗДІЛ VII. ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ І НАПРУГИ. РОЗШИРЕННЯ МЕЖ ВИМІРЮВАННЯ АМПЕРМЕТРІВ І ВОЛЬТМЕТРІВ

### 7.1. Схеми вмикання у вимірювальне коло амперметра і вольтметра за умови меншої похибки

Для вимірювання постійного струму і напруги найширше застосовують прилади магнітоелектричної системи, які є досить чутливими, досить точними і надійними. Для вимірювання змінного струму і напруги застосовують прилади електромагнітної, електродинамічної і випрямної систем.

*Амперметр завжди вмикають в коло послідовно, а вольтметр – паралельно, як показано на рис.7.1.*

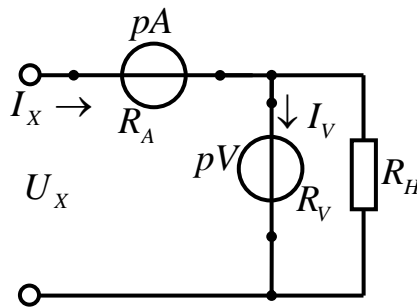


Рис.7.1. Увімкнення в електричне коло амперметра і вольтметра

Щоб увімкнення приладів у коло не змінювало його режиму (струму), необхідно виконання умови

$$R_A \ll R_H; R_V \gg R_H. \quad (7.1)$$

В ідеальному випадку опір амперметра повинен наближатися до 0, а опір вольтметра – до  $\infty$ . В реальних приладах внутрішній опір має граничне значення і через рамку або котушку приладу тече струм  $I_x = U_x / R_H$  або  $I_V = U_x / R_V$ . При деякій напрузі, яка перевищить допустиме значення, струм може так само перевищити допустиме значення, рамка або котушка перегріється і зруйнується. При перевищенні напруги обмотка може зруйнуватись від пробоя ізоляції. Верхня межа вимірювання амперметра або вольтметра залежить від системи і конструкції приладу. Наприклад, у приладах магнітоелектричної системи допустиме значення струму через рамку – від 100

мкА до 10 мА, допустимий спад напруги на рамці – від 75 мВ до 100 В. Прилади електромагнітної і електродинамічної систем мають верхню межу вимірювання до 5А, а спеціальні конструкції електромагнітних амперметрів – до 300А.

## **7.2. Розширення меж вимірювання амперметрів постійного струму за допомогою шунта і вольтметрів за допомогою додаткового резистора**

У практиці випробувань і експлуатації електроустановок виникає необхідність вимірювання струмів від  $10^{-6}$  до  $10^6$  А і напруг до  $10^6$  Вольт.

Для розширення меж вимірювання амперметрів, вольтметрів, ватметрів і лічильників електроенергії застосовують шунти і додаткові резистори, вимірювальні трансформатори струму і вимірювальні трансформатори напруги, перетворювачі струму на ефекті Холла. Шунти і давачі Холла застосовують для вимірювання струмів в електроустановках постійного струму до 6000 А з приладами магнітоелектричної системи. Шунти виготовляють з манганіну – сплаву з великим питомим опором і малим температурним коефіцієнтом опору – (Cu–84%, Mn–12%, Ni–3%, решта Al+Fe). Питомий опір – 0,45мкОм·м, що в 25 разів більше, питомого опору міді. Стандартний шунт виготовляють у вигляді дротяного резистора або шини з двома парами затискачів. Одну пару затискачів використовують для ввімкнення шунта в розгин кола. Ці затискачі називають *струмовими*, вони позначені літерою  $I$ . До другої пари затискачів приєднують амперметр, вони позначені літерою  $U$ , їх називають *потенціальними* або затискачами напруги. Стандартні шунти виготовляють з класом точності від 0,02 до 0,5.

Для розрахунку опору шунта розглянемо схему на рис. 7.2.

Відомими величинами при розрахунку опору шунта є:

$I$  – верхня межа шкали амперметра з шунтом;

$I_A$  – верхня межа шкали амперметра без шунта;

$R_A$  – внутрішній опір амперметра.

Розглянемо співвідношення

$$1) I_{ш} = I - I_A; \quad 2) I / I_A = n; \quad 3) I_{ш} R_{ш} = I_A R_A$$

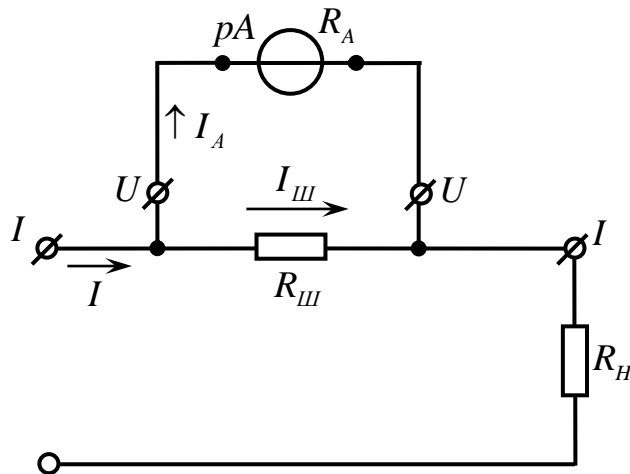


Рис. 7.2. Схема увімкнення амперметра з шунтом

Праву і ліву частини 1) поділимо на  $I_A$ , отримаємо  $I / I_A = n$ , підставимо в 3) і отримаємо:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}. \quad (7.1)$$

Для розширення меж вимірювання вольтметрів використовують додаткові резистори. Додатковий резистор вмикають послідовно з рамкою, як зображено на рис.7.3.

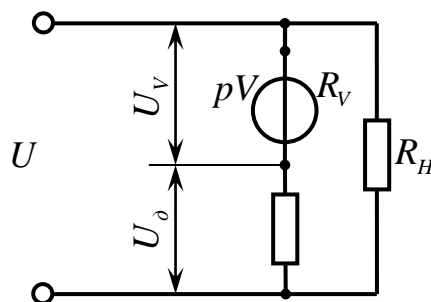


Рис. 7.3. Схема увімкнення вольтметра з додатковим резистором

Відомими величинами при розрахунку опору додаткового резистора є:

$U$  – верхня межа шкали вольтметра з додатковим резистором;

$U_V$  – верхня межа шкали вольтметра без додаткового резистора;

$R_V$  – внутрішній опір вольтметра.

Розглянемо співвідношення між напругами і опором електричного кола, зображеного на схемі.



$$1)U = U_V + U_\partial; 2)U_V / R_V = U_\partial / R_\partial; 3)U / U_V = n.$$

Рівняння 3) підставимо в 1) і отримаємо:

$$U_V(n-1) = U_\partial, \quad (7.2)$$

(7.2) підставимо у (2) і отримаємо:

$$\mathbf{R}_\partial = \mathbf{R}_V(n-1), \quad (7.3)$$

Стандартні додаткові резистори виготовляють з манганінового дроту і використовують з приладами електродинамічної, електромагнітної і магнітоелектричної систем як на постійному, так і на змінному струмі з частотою до 20 кГц і напругою до 30 кВ.

Номінальний струм через додатковий резистор – 0,5 – 30 мА.

### **7.3. Вимірювання великих постійних струмів (до 1000 А) за допомогою давачів Холла**

Шунти застосовують також в системах автоматичного регулювання струму якоря в електроприводах постійного струму. В таких схемах шунт вмикають послідовно в коло якоря, спад напруги на шунті, пропорційний струму, подають на вхід операційного підсилювача, який перетворює вхідний сигнал в уніфікований сигнал струму 0...5 мА або напруги 0...10 в.

Класичний метод вимірювання великих струмів за допомогою шунта має суттєві недоліки. Чим більший струм протікає через шунт, тим більші розміри і масу повинен мати шунт. Шунти виготовляють з манганіну, дорогого сплаву. При протіканні струму шунт нагрівається і потужність на нагрівання незворотно втрачається. А є такі технологічні процеси на постійному струмі в 1000 А, десятки і сотні тисяч Ампер. Наприклад, електрометалургія кольорових металів – магнію, алюмінію, міді, випрямлячі і інвертори для ліній передачі електроенергії постійним струмом та ін. Використання шунтів при великих струмах є енерго- і матеріаловитратним.

Сучасним прогресивним методом вимірювання потужного постійного струму є метод, побудований на ефекті Холла. Схема давача струму на ефекті Холла зображена на рис.7.4. Давач Холла виготовляється з кристалу германію,

кремнію, арсеніду галію у формі прямокутної платівки міліметрових розмірів. Якщо таку платівку помістити в магнітне поле і через грані платівки пропустити струм  $\vec{I}$ , вектор напрямку якого перпендикулярний вектору індукції поля  $\vec{B}$ , то на протилежних гранях платівки з'явиться різниця потенціалів  $U_x$ , значення якої

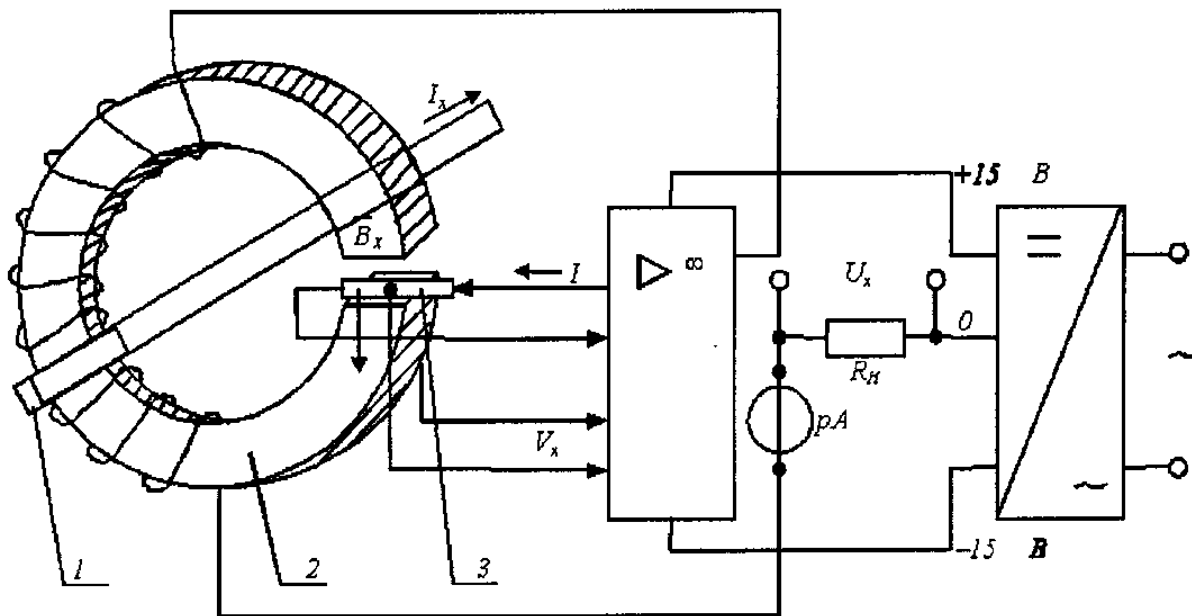


Рис. 7.4. Схема масштабного перетворювача постійного струму

1-провідник з вимірюваним струмом  $I_x = 100 \dots 1000 \text{ A}$ ; 2-осердя з пермалюю; 3-давач Холла;  $U_x$  - уніфікований сигнал напруги  $0 \dots 10 \text{ V}$ .

$$U_x = \gamma \cdot I \cdot B,$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт магніточутливості, який визначається матеріалом напівпровідника та розмірами платівки. Розміри платівки від  $(12 \times 6 \times 0,2) \text{ мм}$  до  $(1,8 \times 0,6 \times 0,16) \text{ мм}$ , матеріал – Ge, Si, арсенід галію, арсенід індію, антимонід індію,  $\gamma \approx (9 \dots 90) \frac{\text{В}}{\text{А} \cdot \text{Т}}$ .

Давачі струму на ефекті Холла серійно виготовляє фірма LEM (Швейцарія). В Україні розробкою аналогічних давачів у 1990 р. займалось ТОВ “Еконт” (м. Харків, а/я 5596; головний конструктор Рафф В.С.). Схема на рис.7.4. запозичена з реального перетворювача  $100 \text{ A}/100 \text{ mA}$ , виготовленого в ТОВ “Еконт”.

## Контрольні запитання

- 1) Яким повинен бути опір амперметра і опір вольтметра щоб похибки вимірювання струму й напруги були найменшими ?
- 2) Схема амперметра з шунтом. Розрахунок опору шунта.
- 3) Чому шунти не застосовують до електромагнітних амперметрів ?
- 4) Схема вольтметра з додатковим резистором. Розрахунок додаткового резистора. Чому шунти і додаткові резистори виготовляють з манганіну ?
- 5) Які властивості манганіну – хімічний склад, питомий опір, ТКО?
- 6) Схема ампервольтметра.
- 7). Недоліки застосування шунтів, альтернатива шунтам.
- 8) Яких умов потрібно дотримуватись при виборі схеми включення вольтметра при вимірюванні опору методом амперметра і вольтметра?
- 9) Вимірювання опору методом вольтметра.
- 10) Вимірювання опору методом амперметра.
- 11) Градування шкали кілоомметра
- 12) Градування шкали омметра.

## РОЗДІЛ VIII. ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

Для вимірювання великих змінних струмів і високих напруг змінного струму застосовують вимірювальні трансформатори струму і напруги. Застосування вимірювальних трансформаторів дозволяє використовувати вимірювальні прилади з уніфікованими межами вимірювання (0...2 А; 0...5 А; 0...100 В ) для вимірювання струмів до сотень тисяч А і напруг до  $10^6$  В. Вимірювальні трансформатори виконують також функцію гальванічного розділення силового і вимірювального кіл. Гальванічне розділення забезпечує захист вимірювальних приладів і обслуговуючого персоналу від високої напруги силового кола.

Вимірювальний трансформатор складається з магнітопроводу і двох обмоток – первинної з числом витків  $W_1$  і вторинної з числом витків  $W_2$ . Виводи первинної обмотки приєднуються до кола, в якому вимірюють струм чи напругу, до виводів вторинної обмотки приєднують вимірювальний прилад – амперметр до трансформатора струму, вольтметр – до трансформатора напруги.

### 8.1. Вимірювальний трансформатор струму

Схема увімкнення вимірювального трансформатора струму у лінію з навантаженням зображена на рис. 8.1.

Первинна обмотка трансформатора струму вмикається в електричне коло затискачами  $L_1 - L_2$  послідовно з навантаженням, до затискачів вторинної обмотки  $U_1 - U_2$  приєднують амперметр або струмову обмотку ватметра чи лічильника, яка для трансформатора струму є навантаженням. Оскільки опір амперметра малий, наближений до нуля, **трансформатор струму працює в режимі короткого замикання**. До одного із затискачів вторинної обмотки приєднують заземлення.

У трансформаторі струму через первинну обмотку протікає силовий струм  $I_1$ , який є значно більшим струму вторинної обмотки  $I_2$ . Уніфіковані значення  $I_{1ном}$ , встановлені стандартом, дорівнюють 10А ;

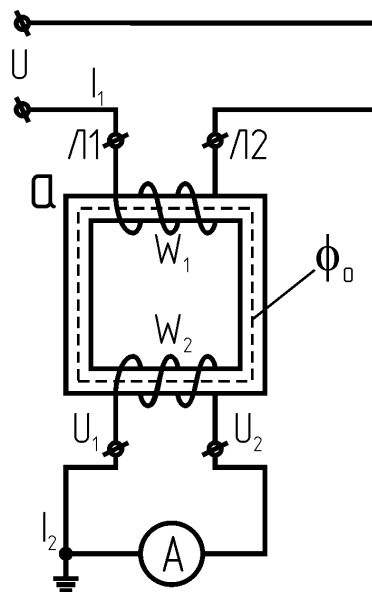


Рис.8.1. Схема ввімкнення амперметра з вимірювальним трансформатором струму

25А; 50А; 75А; 100А; 500А і т.д. Уніфіковані значення струму  $I_{2ном}$  дорівнюють 1А; 2А; 2,5А; 5А. Отже, первинна обмотка повинна мати мало витків дроту значно більшої площі перерізу. При струмі 500А і більше обмоткою є мідна шина, пропущена через вікно осердя. Вторинна обмотка має багато витків мідного дроту малої площі перерізу.

Основними технічними характеристиками трансформатора струму є:

$I_{1ном}, I_{2ном}$ , номінальний опір навантаження  $Z_H$  і частота струму  $f_H$ .

Відношення струмів  $\frac{I_1}{I_2} = K_I$  називають коефіцієнтом трансформації за струмом.

Розрізняють *номінальний*  $\frac{I_{1ном}}{I_{2ном}} = K_{Iном}$  і *дійсний*  $K_I$  коефіцієнти трансформації.

Номінальний коефіцієнт трансформації є величиною постійною для даного трансформатора. Його значення вказане у паспорті трансформатора у вигляді дроби  $\frac{I_{1ном}}{I_{2ном}}$ . Вимірюваний струм визначають за формулою

$$I_1 = K_{Iном} \cdot I_2, \quad (8.1)$$

де  $I_2$  – показ амперметра.

Через те, що  $K_{I_{ном}} \neq K_I$  виникає методична похибка вимірювання

$$\gamma_I \% = \frac{K_{I_{ном}} - K_I}{K_I} \cdot 100. \quad (8.2)$$

Цю похибку називають *струмовою* або похибкою за струмом. Враховуючи, що значення  $K_I$  і  $K_{I_{ном}}$  дуже близькі, у практиці вимірювань

користуються формулою  $\gamma_I \% = \frac{K_{I_{ном}} - K_I}{K_{I_{ном}}} \cdot 100$

Крім того, в реальному трансформаторі зсув за фазою між струмами  $I_1$  та  $I_2$  не дорівнює  $180^\circ$ , як в ідеальному, а дещо менше, на величину  $\delta_I$ , яку називають *кутовою* похибкою. Кутлова похибка не впливає на покази амперметрів, але впливає на покази ватметрів і лічильників енергії. Струмова і кутлова похибки залежать від втрат потужності в трансформаторі – втрат на перемагнічування і вихрові струми в осерді і втрат на нагрів обмоток. Для зменшення втрат на перемагнічування та вихрові струми осердя трансформатора виготовляють тороїдної форми зі сплаву пермалою. зменшують опір вторинної обмотки та нормують опір навантаження. Так, при вторинному струмі 5А і класах точності 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 10 номінальний опір навантаження є таким: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6 Ом. Сумарний опір приєднаних до вторинної обмотки приладів не повинен перевищувати значення  $Z_I$ , вказаного на щитку трансформатора.

Векторна діаграма трансформатора струму зображена на рис. 8.2.

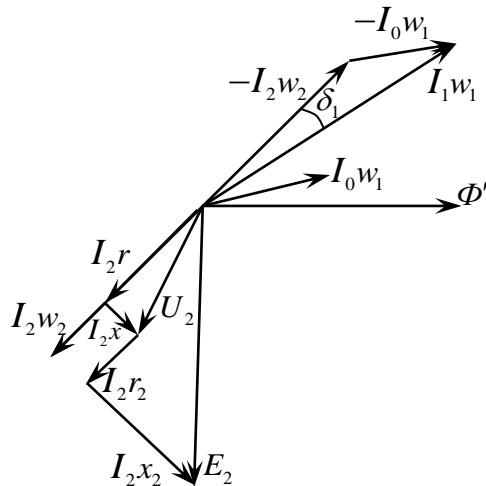


Рис. 8.2. Векторна діаграма вимірювального трансформатора струму

При розімкненні вторинної обмотки трансформатор струму переходить в аварійний режим. З теорії трансформаторів відомо, що магнітний потік  $\Phi$  в осерді створює результуюча намагнічуюча сила  $I_0 w_1$ , яка дорівнює

$$I_0 w_1 = I_1 w_1 + I_2 w_2. \quad (8.3)$$

При нормальній роботі трансформатора (режим, близький до КЗ)  $I_2 \neq 0$ , розмагнічуюча дія  $I_2 w_2$  велика і намагнічуюча сила  $I_0 w_1$ , а також і потік  $\Phi$  досить малі. При розімкненій вторинній обмотці  $I_2 = 0$ ;  $I_0 w_1 = I_1 w_1$ , потік  $\Phi$  значно зростає, що призводить до зростання вихрових струмів в осерді, його нагріву і зростанню ЕРС на затискачах вторинної обмотки до небезпечного значення. Тому перед вимкненням амперметра затискачі  $U_1 - U_2$  обов'язково потрібно замкнути накоротко.

## 8.2. Вимірювальний трансформатор напруги

Схема ввімкнення вимірювального трансформатора напруги зображена на рис.8.3, векторна діаграма - на рис.8.4.

Основними характеристиками трансформатора напруги є:

- номінальні значення первинної і вторинної напруг  $U_{1ном}$  та  $U_{2ном}$  ;
- номінальна потужність навантаження  $P_{2ном}$  ;

- номінальна частота струму  $f_{ном}$ .

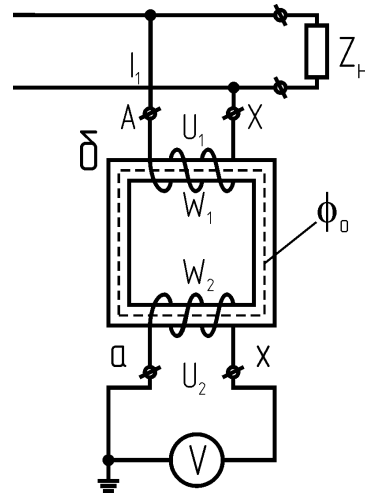


Рис. 8.3. Схема ввімкнення вимірювального трансформатора напруги

Первинна обмотка трансформатора напруги затискачами  $A - X$  приєднується до електроприймача (навантаження) паралельно.

До затискачів  $a-x$  вторинної обмотки приєднують вольтметр або обмотку напруги ватметра чи лічильника. Оскільки опір вольтметра великий, наблизений до нескінченності, то **трансформатор напруги працює в режимі холостого ходу**.

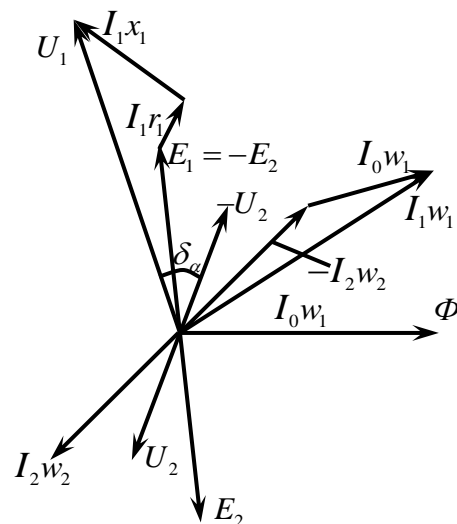


Рис. 8.4. Векторна діаграма вимірювального трансформатора напруги

До одного із затискачів вторинної обмотки приєднують заземлення. Режим короткого замикання для трансформатора напруги є аварійним.



Відношення  $\frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = K_{Uном}$  називають номінальним коефіцієнтом

трансформації за напругою, а відношення  $\frac{U_1}{U_2} = K_U$  називають дійсним коефіцієнтом трансформації за напругою. Номінальні значення первинної і вторинної напруг стандартизовані. Для вторинної напруги встановлені наступні значення  $U_{2ном}$

$$U_{2ном} = 100 \text{ В}; U_{2ном} = 150 \text{ В} \text{ і } U_{2ном} = 100 / \sqrt{3} \text{ В}$$

при первинних напругах від 220 В до 750 кВ.

Вимірювану напругу знаходять за формулою:

$$U_1 = K_{Uном} \cdot U_2. \quad (8.4)$$

Через те, що  $K_{Uном} \neq K_U$  виникає похибка за напругою, а через втрати потужності в обмотках і в сталі осердя – кутова похибка. Похибку за напругою оцінюють відносною величиною

$$\gamma_U \% = \frac{K_{Uном} - K_U}{K_U} \cdot 100 = \frac{(K_{Uном} \cdot U_2) - U_1}{U_1} \cdot 100. \quad (8.5)$$

Кутовою похибкою називають кут  $\delta_U$  між вектором напруги  $U_1$  і повернутим на  $180^\circ$  вектором напруги  $U_2$ . Кутову похибку оцінюють в мінутах і вважають її додатною, якщо обернений на  $180^\circ$  вектор  $U_2$  випереджає вектор  $U_1$ .

Обидві ці похибки залежать не тільки від втрат потужності в сталі осердя, але й від втрат в обмотках. Втрати в сталі мінімізують, виготовляючи осердя з пермалою, а втрати в обмотках – вибором відповідного перерізу дроту обмоток і обмеженням номінальної потужності  $P_{2ном}$ . Відповідно до державного стандарту для стаціонарних (робочих) трансформаторів напруги встановлені класи точності 0,2; 0,5; 1,0; 3,0, а для лабораторних – 0,05; 0,1; і 0,2 при номінальних потужностях 5; 10; 15; 25 ВА. Найбільше впливає на похибки вимірювальних трансформаторів навантаження вторинної обмотки. До вторинної обмотки потрібно приєднувати таку кількість приладів, споживана потужність якої не перевищить  $P_{2ном}$ .

### **Контрольні запитання**

- 1). У чому різниця між силовими і вимірювальними трансформаторами ?
- 2). Як вмикається в лінію вимірювальний трансформатори струму ?
- 3). Як вмикається в лінію вимірювальний трансформатор напруги ?
- 4). Що означає поняття “гальванічна розв’язка” і що вона забезпечує у ВТ?
- 5). У якому режимі працює ВТС ?
- 6). У якому режимі працює ВТН ?
- 7). Який режим є аварійним для ВТС і чому ?
- 8). Який режим є аварійним для ВТН ?

## РОЗДІЛ ІХ. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ І ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ

### 9.1. Вимірювання потужності в колах постійного та однофазного змінного струму

Потужність електричного струму вимірюють прямим методом за допомогою ватметра і посереднім методом, за допомогою вольтметра і амперметра. При цьому можливі дві схеми ввімкнення – рис. 9.1 а) і 9.1 б).

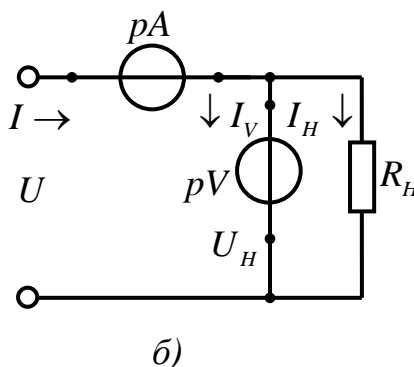
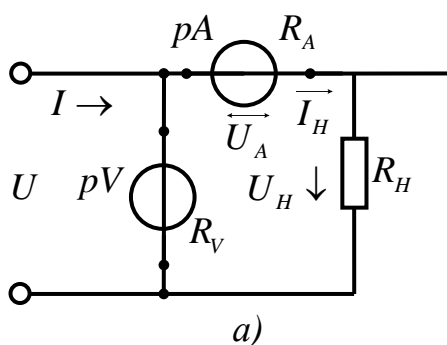


Рис. 9.1. Схеми вимірювання потужності методом вольтметра і амперметра

В обох випадках потужність активного навантаження і на постійному, і на змінному струмі  $P_n = U_n I_n$ . За показами приладів отримуємо

$$P_a = UI = (U_A + U_n)I_n;$$

$$P_a = U_A I_n + U_n I_n = P_A + P_n;$$

$$\text{Для схеми а): } \Delta_a = P_a - P_n = P_A; \quad (9.1)$$

$$\delta_a = \frac{P_A}{P_n} = \frac{I^2 R_A}{I^2 R_n} = \frac{R_A}{R_n}$$

З (9.1) і (9.2) виходить, що при вимірюванні потужності виникає

методична похибка, яка залежить від співвідношення внутрішніх опорів приладів і навантаження. Ця похибка може бути постійною, систематичною, якщо навантаження не змінюється, і може змінюватись при зміні навантаження. Щоб вона була малою, потрібно дотримуватись умови

$$R_A \ll R_H; R_V \gg R_H. \quad (9.2)$$

$$\begin{aligned} P_{\delta} &= U_H I = U_H (I_H + I_V); \\ P_{\delta} &= P_H + P_V; \\ \text{Для схеми б)} \quad \Delta_{\delta} &= P_{\delta} - P_H = P_V; \\ \delta_{\delta} &= \frac{P_V}{P_H} = \frac{U_H^2 / R_V}{U_H^2 / R_H} = \frac{R_H}{R_V} \end{aligned} \quad (9.3)$$

$$\text{Розглянемо співвідношення} \quad \frac{\delta_a}{\delta_{\delta}} = \frac{P_A}{P_V} = \frac{R_A R_V}{R_H^2} \quad (9.4)$$

Якщо  $R_A R_V < R_H^2$ , то  $\delta_a < \delta_{\delta}$ , і слід обирати схему 9.1 а).

Якщо ж  $R_A R_V > R_H^2$ , то  $\delta_{\delta} < \delta_a$  і обирати слід схему 9.1 б). При точніших вимірюваннях цю систематичну похибку можна обчислити і виключити з результату. Зазвичай, вимірювання потужності в діючих електроустановках і лабораторіях здійснюють ватметрами. Для лабораторних вимірювань застосовують електродинамічні ватметри класу 0,1, 0,2 і 0,5, а в робочих установках – феродинамічні ватметри класу 1,0, 1,5 і 2,5. Струмову обмотку ватметра вмикають послідовно, аналогічно амперметру, обмотку напруги – паралельно, аналогічно вольтметру в схемах рис.9.1. Генераторний затискач (затискач, помічений \*) струмової обмотки завжди приєднується до + джерела живлення. Генераторний затискач обмотки напруги залежно від співвідношення опорів обмоток до опору навантаження, приєднують за схемою рис.9.1, а), або 9.1, б).

## 9.2. Короткі відомості з теорії трифазних кіл

В сучасній електроенергетиці виробництво електричної енергії, її передача на відстань та споживання здійснюються трифазним змінним струмом. У трифазній системі струмів джерелом електричної енергії є трифазний синхронний генератор, який на статорі має три обмотки (при одній

парі полюсів). Геометричні осі обмоток розходяться під кутом  $120^\circ$ . Початки обмоток позначаються літерами А, В, С і виводяться на зовнішні затискачі. Кінці обмоток з'єднуються всередині в одну точку, яка теж під'єднується до зовнішнього затискача, що позначається літерою N. На осерді ротора розміщена обмотка, до якої через щітки і кільця подається напруга від джерела постійного струму – збудника. При обертанні ротора створюється змінне магнітне поле, потік якого замикається через осердя ротора і статора і перетинає провідники трифазної обмотки статора. За законом електромагнітної індукції в обмотках наводяться ЕРС, які між собою зсунуті за фазою на кут  $120^\circ$ . Якщо ЕРС, напруги та струми трифазного кола мають одне й те саме значення в усіх фазах і зсунуті за фазою на однакові кути, то система називається **симетричною**. Послідовність фаз А, В, С вибирають такою, щоб ЕРС джерела у кожній наступній фазі відставала від ЕРС попередньої фази. За додатний напрям обертання векторів ЕРС у трифазній системі вибрано напрям руху проти стрілок годинника. Послідовність фаз у такій системі називають **прямою послідовністю фаз**.

Напруги симетричної трифазної мережі у вигляді векторної діаграми представлені на рис. 9.2. Напруги  $U_A, U_B, U_C$  між фазним проводом і нульовим називають фазними, напруги  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  - лінійними.

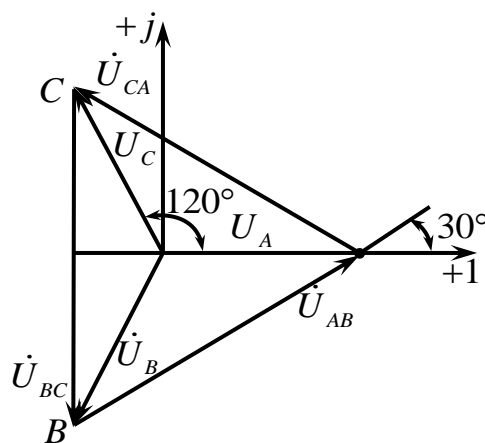


Рис. 9.2. Векторна діаграма напруг генератора з симетричним навантаженням

При прямій послідовності фаз поточні значення фазних напруг джерела подаються аналітичними виразами (9.5), (9.6) і (9.7) у тригонометричній, показниковій або алгебраїчній формах.

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_{\delta m} \sin \omega t; \\
 U_B &= U_{\delta m} \sin(\omega t - 120^\circ); \\
 U_C &= U_{\delta m} \sin(\omega t + 120^\circ);
 \end{aligned}
 \tag{9.5}$$

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_\phi; \\
 U_B &= U_\phi e^{-j120^\circ}; \\
 U_C &= U_\phi e^{+j120^\circ};
 \end{aligned}
 \tag{9.6}$$

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_\delta; \\
 U_B &= U_\delta (-0,5 - j0,867); \\
 U_C &= U_\delta (-0,5 + j0,867);
 \end{aligned}
 \tag{9.7}$$

З векторної діаграми і виразу (9.7) доводимо, що модуль вектора лінійної напруги  $U_L = \sqrt{3}U_\phi$ . В схемі навантаження трикутником  $I_L = \sqrt{3}I_\phi$ .

### 9.3. Вимірювання активної потужності при симетричному навантаженні трифазного кола «зіркою» та «трикутником»

Активна потужність, що споживається навантаженням, ввімкненим зіркою або трикутником у трифазну мережу за схемою рис. 9.2-9.4 визначається сумою потужностей трьох фаз

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3$$

При симетричній мережі і симетричному навантаженні

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_\phi; I_1 = I_2 = I_3 = I_\phi; \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_\phi; P = 3P_\phi$$

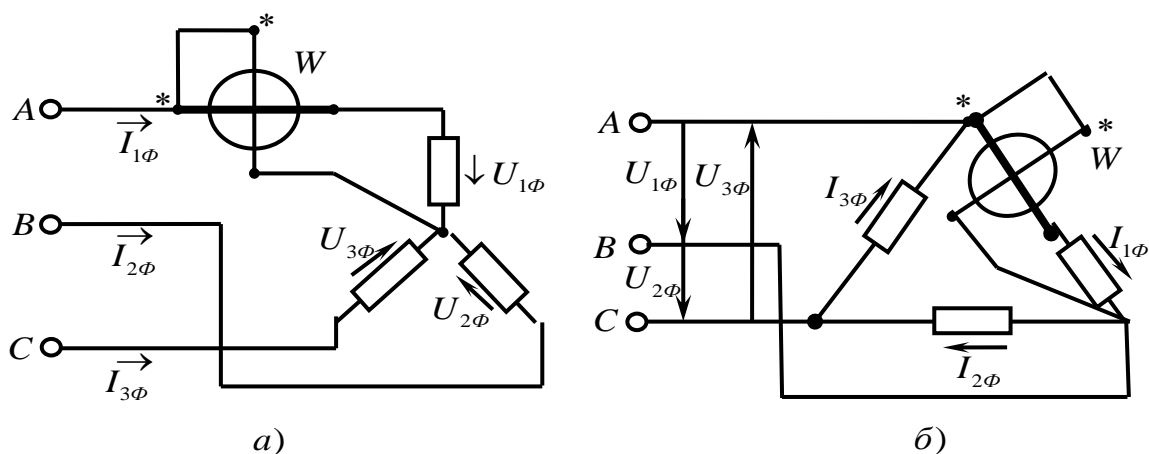


Рис. 9.3. Схеми вимірювання потужності в симетричних трифазних колах одним ватметром: а) – навантаження «зіркою»; б) – навантаження «трикутником».

Як що ж нейтральна точка мережі недоступна, то з активних резисторів створюють штучну нейтраль, як показано на рис. 9.4, а. Опори резисторів вибирають за умовою  $r_1 + R_1 = r_2 + R_2 = r_3 + R_3$ . При вимірюванні потужності (рис. 9.3 б) через струмову обмотку ватметра тече лінійний струм в  $\sqrt{3}$  разів більший фазного, але паралельна обмотка приєднана до фазної напруги, яка в  $\sqrt{3}$  разів менша за лінійну.

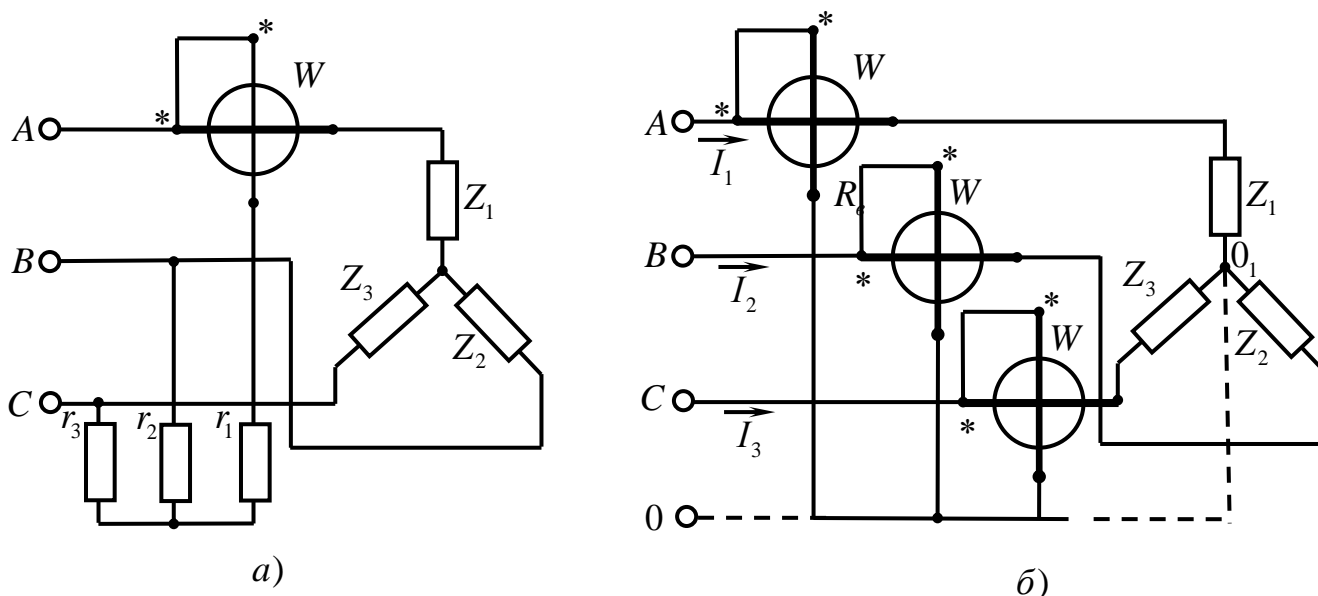


Рис.9.4. а) Ввімкнення ватметра зі штучною нейтраллю; б) метод трьох ватметрів при навантаженні зіркою

#### 9.4. Вимірювання активної потужності трифазної мережі методом двох ватметрів (схема Арона)

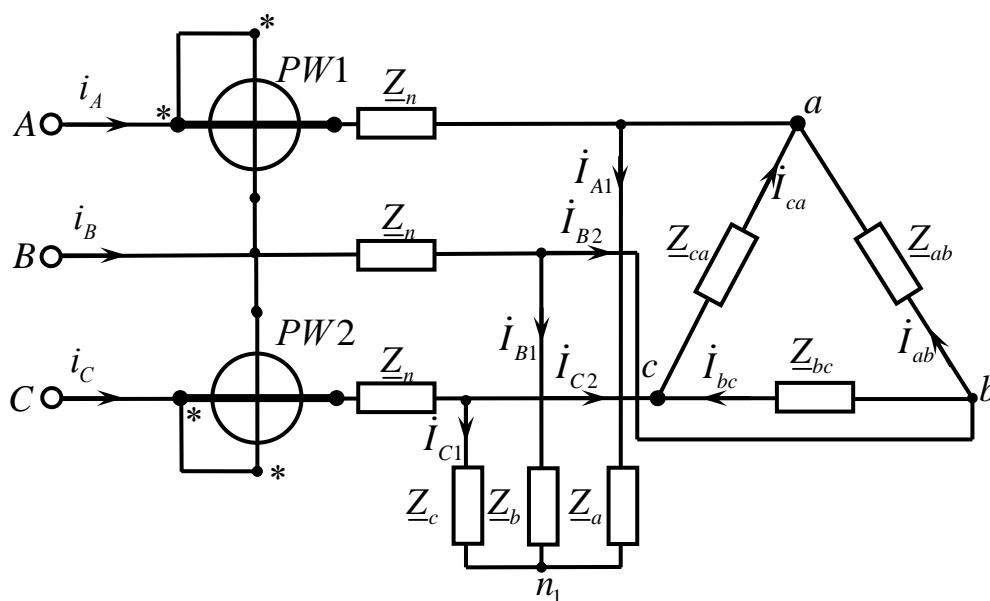


Рис. 9.5. Схема ввімкнення ватметрів для вимірювання активної потужності методом двох ватметрів

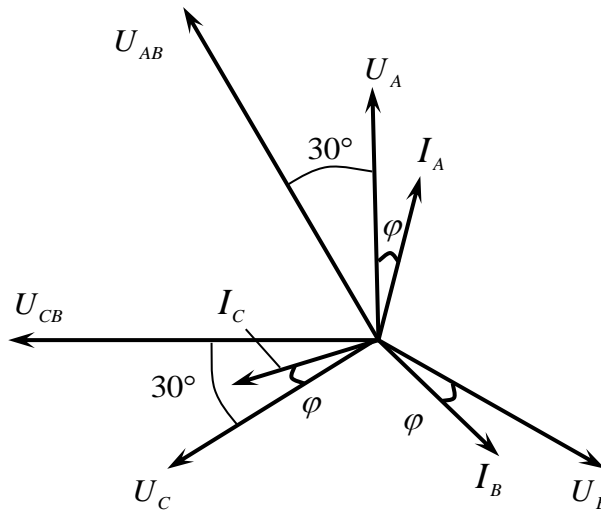


Рис. 9.6. Векторна діаграма напруг і струмів трипровідної трифазної мережі з навантаженням “зіркою” і “трикутником”

Згідно зі схемою і векторною діаграмою маємо:

$$PW1 = I_A U_{AB} \cdot \cos(U_{AB} I_A) = I_\phi U_{\text{лін}} \cdot \cos(30^\circ + \varphi);$$

$$PW2 = I_C U_{CB} \cdot \cos(U_{CB} I_C) = I_\phi U_{\text{лін}} \cdot \cos(30^\circ - \varphi);$$

$$PW1 + PW2 = U_\phi I_\phi [\cos(30^\circ + \varphi) + \cos(30^\circ - \varphi)];$$

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

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

Отже, згідно правилам тригонометрії

$$PW1 + PW2 = U_\phi I_\phi [(\cos 30^\circ \cdot \cos \varphi - \sin 30^\circ \cdot \sin \varphi) + \\ + (\cos 30^\circ \cos \varphi + \sin 30^\circ \sin \varphi)] = \sqrt{3} U_\phi I_\phi \cdot 2 \cos 30^\circ \cdot \cos \varphi;$$

$$PW1 + PW2 = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3 P_\phi.$$

## 9.5. Вимірювання реактивної потужності у трифазних колах

Реактивна потужність трифазного кола визначається сумою реактивних потужностей окремих фаз:

$$Q_\Sigma = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C. \quad (9.8)$$

При симетричному навантаженні фаз

$$Q_\Sigma = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi \quad (9.9)$$



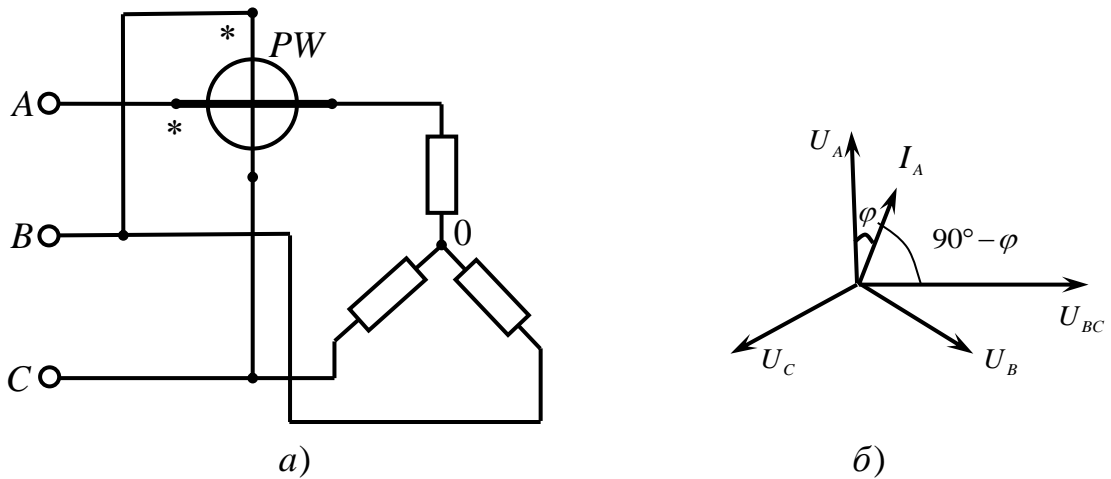


Рис. 9.7. Схема вмикання ватметра для вимірювання реактивної потужності у трифазній мережі з симетричним навантаженням

$$PW = I_A U_{\hat{A}\hat{B}} \cos(90^\circ - \varphi) = I_\delta U_{\hat{e}} \sin \varphi = \sqrt{3} U_\delta I_\delta \sin \varphi = \sqrt{3} Q_\delta$$

$$Q_\Sigma = \sqrt{3} \cdot PW = 3Q_\delta \quad (9.10)$$

Вимірювання реактивної потужності можна виконувати за допомогою звичайних електродинамічних і феродинамічних однофазних ватметрів. Залежно від симетрії навантаження застосовують методи одного, двох і трьох ватметрів. Крім того, реактивну потужність вимірюють також за допомогою дво- і триелементних електродинамічних і феродинамічних варметрів, які конструктивно нічим не відрізняються від ватметрів, але їх обмотки вмикаються в коло за спеціальними схемами, розглянутими нижче. Ці схеми побудовані за такими правилами:

- струмові обмотки вмикають у трифазне коло так само, як при вимірюванні активної потужності;
- обмотки напруги потрібно вмикати на ті напруги трифазного колаа, лінійні чи фазні які відстають на  $90^\circ$  від напруг, до яких приєднуються ці обмотки при вимірюванні активної потужності

При несиметричному навантаженні фаз реактивну потужність вимірюють за методом двох ватметрів. Схема вмикання приладів зображена на рис. 9.8.

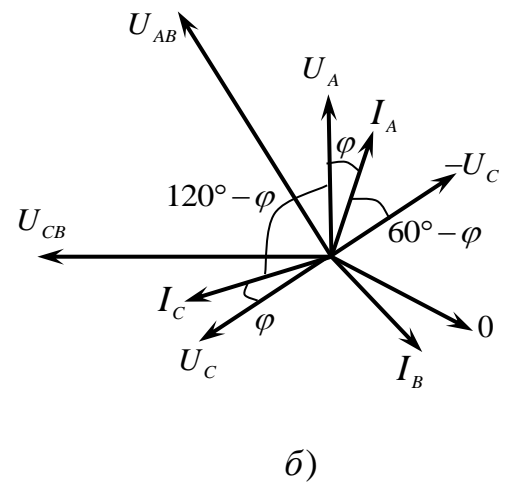
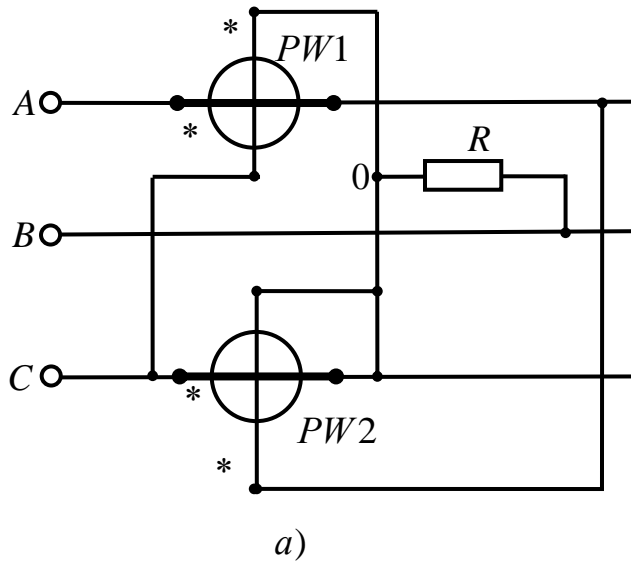


Рис. 9.8. Схема вмикання двох ватметрів при вимірюванні реактивної потужності

Згідно зі схемою:

$$PW1 = I_A U_C \cos[(\overline{I_A}(-\overline{U_C}))] = I_\phi U_\phi \cos(60^\circ - \varphi),$$

$$PW2 = I_C U_A \cos(\overline{I_C} \overline{U_A}) = I_\phi U_\phi \cos(120^\circ - \varphi).$$

$$\cos(60^\circ - \varphi) = \cos 60^\circ \cdot \cos \varphi + \sin 60^\circ \sin \varphi = \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi,$$

$$\cos(120^\circ - \varphi) = \cos 120^\circ \cdot \cos \varphi + \sin 120^\circ \cdot \sin \varphi = -\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi,$$

$$PW1 + PW2 = I_\phi U_\phi \cdot \sqrt{3} \sin \varphi = \sqrt{3} Q_\phi.$$

$$Q_\Sigma = \sqrt{3}(PW1 + PW2) = 3Q_\phi \quad (9.11)$$

Вимірювання реактивної потужності за схемою з трьох ватметрів

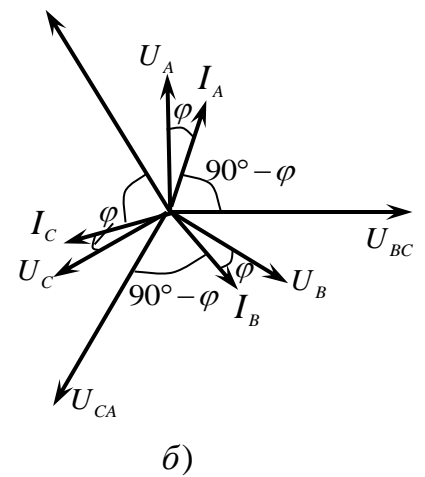
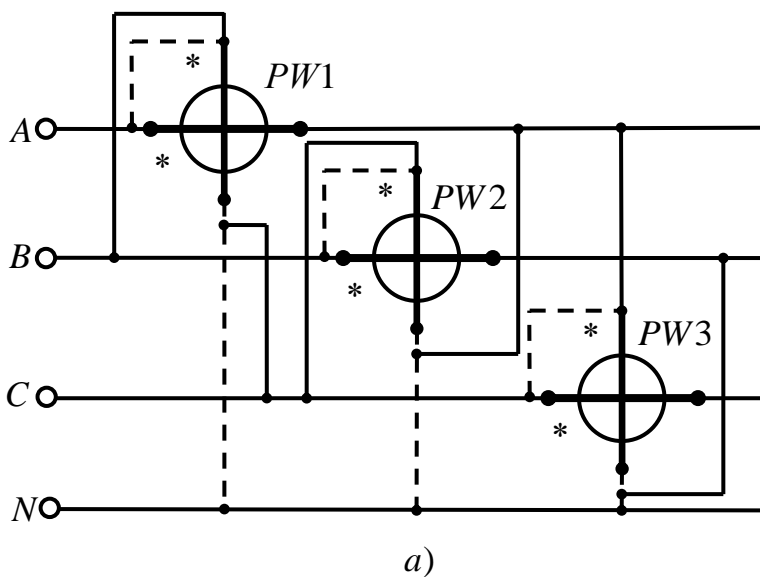


Рис. 9.9. Схема вмикання ватметрів при вимірюванні реактивної потужності трьома ватметрами

Згідно зі схемою і векторною діаграмою:

$$PW1 = I_A U_{BC} \cos(90^\circ - \varphi) = I_\phi U_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} I_\phi U_\phi \sin \varphi$$

$$PW2 = I_B U_{CA} \cos(90^\circ - \varphi) = I_\phi U_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} I_\phi U_\phi \sin \varphi$$

$$PW3 = I_C U_{AB} \cos(90^\circ - \varphi) = I_\phi U_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} I_\phi U_\phi \sin \varphi$$

$$PW1 + PW2 + PW3 = 3\sqrt{3}Q_\phi ;$$

$$Q_\Sigma = 3Q_\phi = \frac{1}{\sqrt{3}}(PW1 + PW2 + PW3) \quad (9.12)$$

### Контрольні запитання:

- 1). При якій умові потужність навантаження трифазного кола можна виміряти одним ватметром і одним вимірюванням?
- 2). Наведіть схему ввімкнення ватметра у чотирипровідну мережу з симетричним навантаженням зіркою.
- 3). Наведіть схему ввімкнення ватметра у трипровідну мережу з симетричним навантаженням трикутником.
- 4). Наведіть схему ввімкнення ватметра у трипровідну мережу з симетричним навантаженням зіркою.
- 5). Наведіть схему ввімкнення ватметра для вимірювання реактивної потужності у трипровідну мережу з симетричним навантаженням зіркою.
- 6). Наведіть схему ввімкнення ватметрів у трипровідну мережу для вимірювання активної потужності методом двох ватметрів.
- 7). Наведіть схему ввімкнення ватметрів у трипровідну мережу для вимірювання реактивної потужності методом двох ватметрів.

## РОЗДІЛ X. МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ

У практиці експлуатації електроустановок систем електропостачання виникає необхідність вимірювання опорів елементів СЕП – ділянок повітряних і кабельних ліній, активних і комплексних опорів обмоток трансформаторів і електричних машин, опорів ізоляції кабелів, опорів заземлень і т. і. Діапазон опорів, які необхідно вимірювати у практиці, поділений умовно на три частини – малі опори (менше 10 Ом), середні (від 10 до  $10^6$  Ом) і високі (більше  $10^6$  Ом). На точність вимірювання опору в кожному діапазоні впливають свої фактори, і тому у кожному діапазоні застосовують свої методи.

При вимірюваннях в діапазоні малих опорів потрібно застосовувати методи і вимірювальні схеми, які виключають з результату опір з'єднувальних проводів і перехідних контактів, вплив контактної термо-ЕРС. Вимірювання малих опорів, як правило, виконують подвійними мостами і компенсаторами постійного струму.

Вимірювання великих опорів має свої особливості. Вимірюваний опір стає співмірним з опором ізоляції приладу і проводів, проявляється вплив зовнішнього середовища – температури, вологості, напруги, прикладеної до вимірюваного опору. Вимірювання великих опорів виконують одинарними мостами постійного струму (до  $10^{10}$  Ом) та спеціальними високоомними мостами (до  $10^{16}$ ).

### 10.1. Вимірювання опорів методом амперметра і вольтметра

Цим методом можна вимірювати опори в широкому діапазоні – від  $10^{-6}$  до  $10^{13}$ . Похибка вимірювання залежить від схеми вмикання приладів та їх внутрішнього опору. Застосовують дві схеми вмикання приладів, зображені на рис. 9.1 а) і б). У цих схемах вимірюваний опір вмикають замість навантаження, тобто  $R_H = R_x$ . Вимірне значення опору  $R_{x\hat{a}}$  визначають за показами приладів  $U_V, I_A$  за формулою  $R_{x\hat{a}} = U_V / I_A$

Дійсне значення опору дорівнює  $R_x = U_x / I_x$ .

У схемі рис. 9.1. а) :  $I_A = I_x; U_V = U_x + U_A$

опір, обчислений за показами вольтметра і амперметра, дорівнює

$$R_{x\hat{a}} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_A + U_x}{I_x} = R_A + R_x \quad (10.1)$$

Абсолютна похибка  $\Delta = R_{x\hat{e}} - R_x = R_A$

Відносна похибка  $\delta_a = \frac{R_A}{R_x}$

**Висновок:**  $[\delta_a] \rightarrow 0$ , якщо  $R_x \rightarrow \infty$ . Для зменшення похибки потрібно застосовувати амперметр з найменшим внутрішнім опором, похибка мала при вимірюванні великих опорів. Схему а) доцільно застосовувати при вимірюванні великих опорів.

У схемі 9.1. б) :  $U_V = U_x; I_A = I_V + I_x$

Опір, обчислений за показами приладів, дорівнює

$$R_{x\hat{b}} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_x}{I_x + I_V} \quad (10.2)$$

Дійсне значення опору дорівнює

$$R_x = U_x / I_x.$$

Поділимо почленно чисельник і знаменник на  $I_x$ , отримаємо

$$R_{\hat{b}} = \frac{U_x / I_x}{1 + I_V / I_x} = \frac{R_x}{1 + R_x / R_V}. \quad (10.3)$$

Відносна похибка методу для схеми б) дорівнює

$$\delta_{\hat{b}} = \frac{R_{x\hat{e}} - R_x}{R_x} = \frac{R_{x\hat{e}}}{R_x}. \quad (10.4)$$

**Висновок:**  $[\delta_{\hat{a}}] \rightarrow 0$ , якщо  $R_V \rightarrow \infty$ . Для зменшення похибки потрібно застосовувати вольтметр з високим внутрішнім опором. Цю схему доцільно застосовувати для вимірювання *малих* опорів.

## 10.2. Вимірювання опорів методом вольтметра і методом амперметра

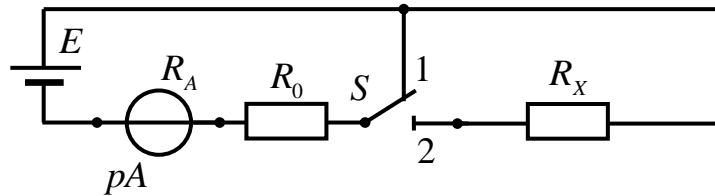


Рис.10.1. Схема для вимірювання опорів методом вольтметра

Метод вольтметра застосовують для вимірювання опорів від  $10^2$  до  $10^8$  Ом. Магнітоелектричний вимірювальний прилад – мікроамперметр або міліамперметр з внутрішнім опором рамки  $R_A$  і додатковим резистором  $R_0$  утворюють вольтметр з внутрішнім опором  $R_V = R_A + R_0$ . Вимірюваний резистор  $R_x$  вмикається послідовно з вольтметром. Опір вимірюють двома діями: спочатку перемикач  $S$  замикають в положення 1 і записують показ стрілки  $\alpha_1$ , потім в положення 2 і записують показ  $\alpha_2$ . Струм, що протікає через рамку приладу при першому вимірюванні:

$$I_1 = \frac{E}{R_A + R_0} = \frac{\alpha_1}{S}. \quad (10.5)$$

При другому вимірюванні опір  $R_x$  додається до опору додаткового резистора  $R_0$ , шкала приладу розширюється, тому  $\alpha_2 < \alpha_1$

$$I_2 = \frac{E}{R_A + R_0 + R_x} = \frac{\alpha_2}{S}. \quad (10.6)$$

Відношення струмів:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_A + R_0 + R_x}{R_A + R_0} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (10.7)$$

$$\text{Звідси:} \quad R_x = \left( \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_2} \right) (R_A + R_0). \quad (10.8)$$

Похибка визначення  $R_x$  залежить від похибок визначення опорів  $R_0$  і  $R_A$ .

У схемі амперметра рис. 10.2 вимірюваний резистор стає на місце шунта. Вимірювання опору здійснюється так само двома діями.

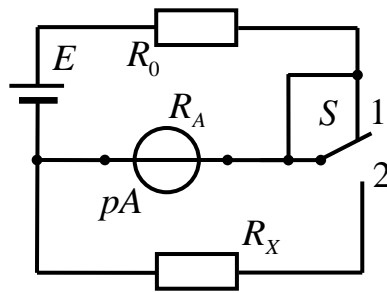


Рис. 10.2. Схема для вимірювання опорів методом амперметра

Струм при першому вимірюванні (перемикач в положенні 1) дорівнює (10.5)

При другому вимірюванні (перемикач в пол.2) струм через амперметр

$$I_2 = \frac{ER_X}{R_0(R_A + R_X) + R_A R_X} = \frac{\alpha_2}{S} \quad (10.9)$$

Відношення струмів

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{R_0 R_A + R_0 R_X + R_A R_X}{R_X \cdot (R_0 + R_A)}$$

Звідси

$$R_X = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot \frac{R_0 \cdot R_A}{R_0 + R_A} \quad (10.10)$$

### 10.3. Прямі методи вимірювання опорів постійному струму

Схеми, зображені на рис. 10.1 і 10.2 можна використати для побудови приладу, шкали якого можна проградувати в Омах і використовувати для прямих вимірювань опорів постійному струму. Вимірювальні прилади, побудовані за цими схемами називають **омметрами**. За схемою вольтметра вимірюють великі опори ( $10 - 10^9$  Ом), за схемою амперметра – відносно малі ( $10 - 1000$  Ом). У схемах омметра об'єднано ці два метода. За допомогою перемикача показуючий магнітоелектричний прилад перемикають в потрібний режим, контролюють і встановлюють стрілку на початок шкали. Якщо шкалу проградувати, то на другому вимірюванні стрілка покаже опір в Омах.

Дійсно, у схемі рис. 10.1 при перемикачі в положенні 1  $R_x = 0$ , струм найбільший, стрілка встановлюється на крайню праву поділку шкали. Це початок шкали. В положенні 2 струм дорівнює (10.6). При  $E = const$  струм залежить від  $R_x$ . При  $R_x = \infty$  маємо  $I_1 = 0$ . Це кінець шкали. Шкала обернена нерівномірна.

У схемі за рис.10.2 в положенні 1 струм найбільший,  $R_x = \infty$ , стрілка амперметра встановлюється на крайню праву поділку шкали. Це кінець шкали. В положенні 2 і  $R_x \neq 0$  струм зменшується, при  $R_x = 0$  стрілка стає на 0. Шкала пряма нерівномірна. У проміжку від 0 до  $\infty$  шкалу градуюють за формулами 10.12 і 10.13, які справедливі за умови

$$I_A = E / R_A + R_0. \quad (10.11)$$

де  $I_A$  - верхня межа шкали мікроамперметра.

#### **10.4. Розрахунок опору, виміряного за схемою вольтметра і градуювання шкали кілоомів**

При вимірюванні опорів на шкалі кілоомів за схемою рис.10.1 після двох вимірювань отримуємо вираз (10.8). Якщо при першому вимірюванні встановити стрілку на кінцеву поділку шкали амперметра, то всю шкалу можна прийняти за 1, тобто можна прийняти, що  $\alpha_1 = 1$ . Тоді при другому вимірюванні стрілка відхилиться на кут  $\alpha_2 = x < 1$ . Для цього випадку рівняння можна записати у вигляді

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{R_A + R_0 + R_x}{R_A + R_0} = 1 + \frac{R_x}{R_A + R_0},$$

якщо  $\alpha_1 = 1$ ;  $\alpha_2 = x$ , то

$$R_x = \frac{1-x}{x}(R_A + R_0) \quad (10.12)$$

$$x = \frac{R_A + R_0}{R_A + R_0 + R_x}$$



Ці формули використовують при градуванні омметра на шкалі кілоомів. Шкалу ділять на  $n$  рівних поділок  $x_1, x_2, \dots, x_n$  і для кожного  $x$  обчислюють  $R_x$ .

При вимірюванні опорів за схемою рис. 10.2 перемикач замикаємо, струм, що протікає через рамку приладу, дорівнює:

$$I_2 = \frac{ER_x}{R_A R_0 + R_x R_0 + R_x R_A}.$$

При  $R_x = 0$  отримуємо  $I_2 = 0$ . При  $R_x = \infty$  отримуємо  $I_2 \rightarrow \infty$ , але має кінцеве значення. Шкала, градуйована в Омах, пряма, нерівномірна.

Як правило, показуючим приладом в омметрах є магнітоелектричний мікроамперметр, обладнаний кількома шунтами і додатковими резисторами. За допомогою перемикача цей прилад можна встановити в один з трьох режимів – амперметра, вольтметра або омметра. Такий багатофункціональний прилад називають *авометром* – ампервольтметром або мультиметром.

### 10.5. Розрахунок опору, вимірюного за схемою амперметра на шкалі Омів

Струм при першому вимірюванні дорівнює (10.5), при другому вимірюванні струм через амперметр

$$I_2' = E \frac{R_x}{R_0(R_A + R_x) + R_A R_x}.$$

Відношення струмів

$$\frac{I_1}{I_2'} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{R_0 R_A}{R_x(R_0 + R_A)} + 1.$$

З останнього

$$R_x = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot \frac{R_0 R_A}{R_0 + R_A}$$

Якщо при першому вимірюванні встановити стрілку на кінець шкали, то  $\alpha_1 = 1; \alpha_2 < 1$ . При  $\alpha_2 = x$

$$R_x = \frac{x}{1-x} \cdot \frac{R_0 R_A}{R_0 + R_A}$$

$$x = \frac{R_x (R_0 + R_A)}{R_0 R_A + R_0 R_x + R_A R_x} \quad (10.13)$$

Ці формули використовують при градуюванні омметра на шкалі Омів.

### 10.6. Логометричні омметри

Недоліком розглянутих схем омметрів є залежність показів від напруги, що потребує перед вимірюванням контролю і регулювання напруги. Від цього недоліку вільні логометричні омметри.

Логометр – це прилад, яким вимірюють відношення двох струмів. Загальний вигляд конструкції і схема магнітоелектричного логометра зображено на рис. 10.3.

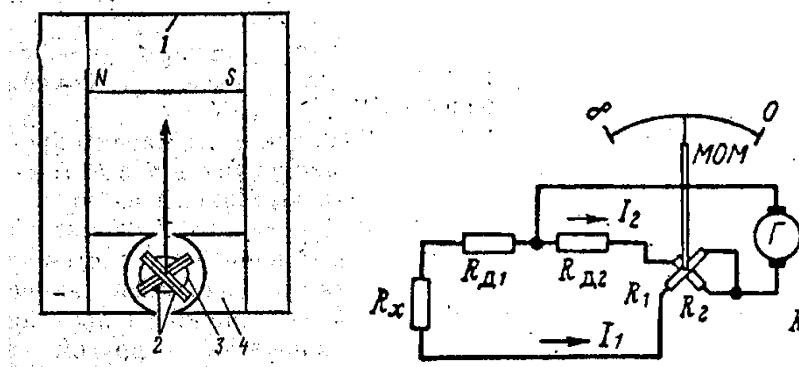


Рис. 10.3. Конструкція і схема логометра з рухомими рамками

Логометр має дві рамки, зміщені між собою на деякий кут і жорстко закріплені на осі. При протіканні струмів через рамки на рухому частину діють два протилежно направлених моменти – крутний і протидіючий. Кут відхилення стрілки пропорційний відношенню струмів.

$$\alpha = f(I_1 / I_2).$$

У схемі рис. 10.3.

$$I_1 = \frac{U}{R_x + R_{д1} + R_1}; I_2 = \frac{U}{R_{д2} + R_2}.$$

Отже,

$$\alpha = f\left(\frac{R_{Д2} + R_2}{R_x + R_{Д1} + R_1}\right). \quad (10.9)$$

Як видно з останнього виразу, при послідовно ввімкненому опорі  $R_x$  в одну з рамок маємо обернену нерівномірну шкалу в Омах і незалежність кута відхилення від напруги живлення схеми. При паралельно ввімкненому до однієї з рамок вимірюваного опорі  $R_x$  отримаємо пряму нерівномірну шкалу. У серійних логометричних мегомметрах типу М10101 з одним логометричним механізмом за допомогою перемикача використовуються обидві схеми. При послідовній схемі верхня межа вимірюваного опору досягає 500 МОм, при паралельній – знижується до 1 МОм. Електромеханічні логометричні омметри – це прилади невисокого класу точності (1,5; 2,5; 4,0). Від 60-х років ХХ ст. їх широко використовували як показуючі прилади неелектричних величин, перетворених в електричний сигнал резистивними давачами (термометрами опору, давачами рівня пального в баках автомобіля, рівня мастила і т.і.), а також, як лабораторні переносні прилади для вимірювання опору ізоляції кабелю. З розвитком мікроелектроніки і цифрової схемотехніки їх використання пішло на спад.

### **Контрольні запитання.**

- 1). Які методи вимірювання опорів є опосередкованими, а які прямими?
- 2). Який основний недолік прямих методів вимірювання опорів прямими методами?
- 3). Що вимірює логометр: опір, пропорційний сумі струмів, різниці струмів чи відношенню струмів, які протікають по обмотках рамок?
- 4). Які переваги має логометричний омметр перед прямим омметром?
- 5). Якщо при вимірюванні опорів застосовують вольтметр з недосить високим внутрішнім опором, то як його ввімкнути: за схемою рис. 10.1, чи за схемою рис. 10.2, щоб похибка вимірювання була найменшою

# РОЗДІЛ XI. ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ І ОПОРУ МЕТОДАМИ ПОРІВНЯННЯ З МІРОЮ

## 11.1. Компенсатор постійного струму

Електромеханічні вимірювальні прилади мають достатньо високу чутливість і точність. Наприклад, магнітоелектричні амперметри і вольтметри на постійному струмі мають граничний клас точності 0,1, а електродинамічні на змінному струмі – 0,2. Але у багатьох випадках практики вимірювань, в тому числі для перевірки робочих приладів, потрібні засоби на кілька порядків вищої точності. Такі вимірювальні засоби побудовані на методі порівняння з мірою. **Міра** – засіб вимірювань, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру. Мірою маси є гиря, мірою ЕРС постійного струму є нормальний елемент. Методами порівняння з мірою є компенсаційний і мостовий.

**Компенсатор** постійного струму – це переносний лабораторний прилад з ручним врівноваженням, призначений для вимірювання напруги постійного струму в діапазоні 10 – 100 мВ і опору постійному струму в діапазоні від  $10^{-3}$  до  $10^3$  Омів. Вимірювальна схема приладу зображена на рис. 11.1.

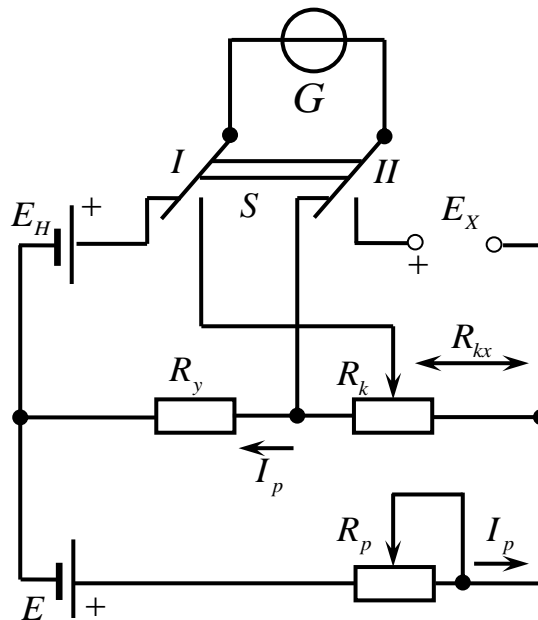


Рис. 11.1. Схема компенсатора постійного струму

Прилад складається з наступних елементів: двох джерел напруги  $E$  та  $E_H$ , трьох резисторів –  $R_p, R_y, R_k$ , мікроамперметра або гальванометра  $G$  і

перемикача  $S$ . Джерело напруги  $E$  призначене для живлення вимірювального кола. Ним може бути гальванічний елемент або випрямляч невеликої потужності. Джерело напруги  $E_H$  – це міра напруги. До нього ставляться високі вимоги щодо стабільності значення напруги, бо вона визначає клас точності приладу. За міру напруги використовують **нормальний елемент** або стабілізований кремнієвий випрямляч. Нормальний елемент (НЕ) – це спеціальний гальванічний елемент, який в режимі холостого ходу має дуже малий саморозряд і тривалий час (кілька років) зберігає стабільне значення ЕРС. Його будова зображена на рис. 11.2.

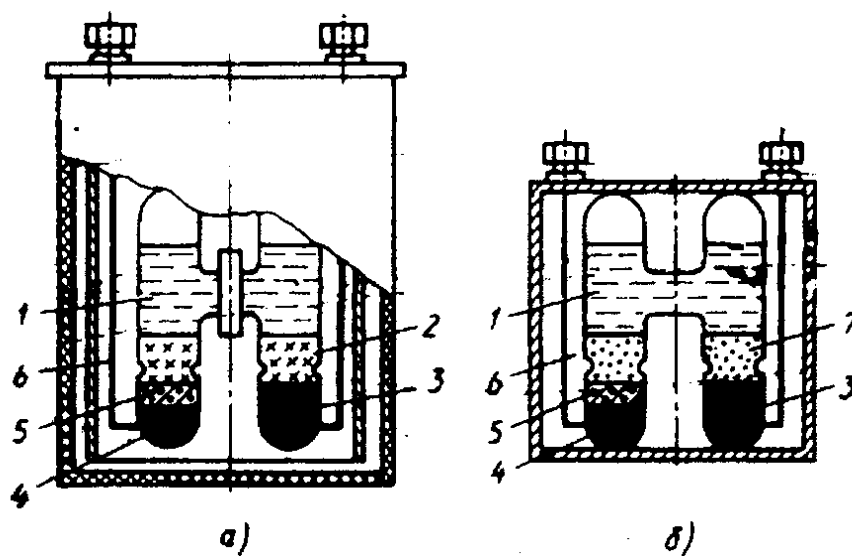


Рис. 11.2. Загальний вигляд нормального елемента – а) насиченого;  
б) ненасиченого

1 – електроліт; 2 – кристали сульфату кадмію; 3 – негативний електрод; 4 – позитивний електрод ртуть; 5 – сульфат закису ртуті; 6 – виводи.

Електролітом в нормальному елементі є водний розчин сульфату кадмію. Позитивним електродом є ртуть і сульфат закису ртуті, негативним – амальгама кадмію (розчин кадмію в ртуті) в твердому й рідкому стані. Виводи електродів до затискачів – з платинового дроту. Все це розміщене в скляному балоні Н-подібної форми, балон – в металевому або пластмасовому корпусі. ЕРС нормального елемента знаходиться в межах 1,0185... 1,0187 В і при дотриманні умов експлуатації зберігається тривалий час. Класи точності НЕ – від 0,0002 до 0,02, струм навантаження – від  $1\mu A$  до  $10\mu A$ . Резистор  $R_p$  потрібен для

регулювання і встановлення робочого струму в колі. Ним може бути звичайний дротяний або вугільний регульований резистор. До нього не ставиться ніяких особливих вимог. Резистор  $R_y$  – зразковий резистор, опір якого повинен бути відомим з високою точністю і бути незмінним при зміні умов навколишнього середовища. Резистор  $R_K$  – це магазин опорів, набір зразкових резисторів. За допомогою перемикачів опір магазину можна регулювати, зчитуючи його значення. Класи точності серійних магазинів опорів – від 0,5 до 0,0001. Резистори  $R_y$  та  $R_K$  – це міри, з якими порівнюють вимірюваний опір. По їх значенням обчислюють значення вимірюваного опору. Гальванометр  $G$  служить як індикатор нуля струму при регулюванні.

Вимірювання  $E_x$  виконують у два етапи. Спочатку перемикач встановлюють в положення I. При цьому через прилад  $G$  тече струм  $I_1$ , зумовлений різницею спаду напруги на резисторі  $R_\rho$  від робочого струму  $I_p$  і ЕРС нормального елемента  $E_H$

$$I_p R_y - E_H = 0 \quad (11.1)$$

Регулюючи резистор  $R_\rho$ , встановлюють  $I_1 = 0$ . При цьому робочий струм

$$I_p = E_H / R_y \quad (11.2)$$

По тому перемикач встановлюють в положення II. У цьому положенні через прилад тече струм обумовлений різницею напруг:

$$I_p R_{Kx} - E_x = 0 \quad (11.3)$$

Регулюванням  $R_K$  встановлюють  $I_2 = 0$ . Отримують

$$E_x = \frac{R_{Kx}}{R_y} \cdot E_H \quad (11.4)$$

Зчитуючи з магазину значення  $R_{Kx}$  і знаючи значення  $E_H$  та  $R_y$ , визначають  $E_x$ .

Цим приладом можна вимірювати також опори. Якщо після вимірювання  $E_x$

замість  $R_y$  приєднати  $R_x$ , то

$$R_x = \frac{R_{кх}}{E_x} \cdot E_H. \quad (11.5)$$

Важливою властивістю компенсатора є те, що в момент врівноваження струм через вимірюване коло, а також через вимірюваний опір, не протікає ( $= 0$ ), значить немає споживання енергії від вимірюваного об'єкта. Отже цим методом можна вимірювати ЕРС джерел дуже малої потужності. Компенсатором можна також вимірювати струми.

Точність вимірювання компенсатором забезпечується точністю нормального елемента, високою чутливістю нуль-індикатора, і стабільністю джерела робочого струму. Серійні компенсатори постійного струму мають класи точності від 0,2 до 0,0005. Їх виготовляють двох типів – високоомні і низькоомні. Внутрішній опір високоомних – 10000 Ом на 1В, верхня межа вимірюваної ЕРС – 1,2 – 2,5 В, робочий струм 0,1 мА.

Для вимірювання зовсім малих напруг ( $1 - 100$  мВ) застосовують низькоомні компенсатори з робочим струмом  $1 - 10 - 25$  мА.

## 11.2. Автоматичний компенсатор постійного струму

Для вимірювання температур у межах від  $200^{\circ}\text{C}$  до  $3000^{\circ}\text{C}$  в технологічних об'єктах теплотехніки, чорної і кольорової металургії застосовують термоелектричні перетворювачі напруги – **термопари**. Чутливий елемент термопари складається з двох дротин з різних металів або сплавів (вольфрам – реній, платинородій – платина, хромель – алюмель і т.і.), з'єднаних зваркою в одній точці (точці спаю). Термопару вмонтовують в технологічний апарат так, щоб точка спаю знаходилась у середовищі контрольованої температури  $T_1$ , а вільні кінці – назовні, при температурі навколишнього середовища  $T_0$ . ЕРС термопари пропорційна різниці температур

$$e_T = \kappa(T_1 - T_0)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт пропорційності  $\text{мВ}/^{\circ}\text{C}$ .

ЕРС термопар в робочому діапазоні температур досягає 10 – 50 мВ. Автоматичні компенсатори застосовують не для разових вимірювань, а для неперервного контролю і регулювання технологічного процесу. Тому, крім вимірювальної схеми вони обладнані записуючим пристроєм.

Функціональна схема автоматичного компенсатора зображена на рис. 11.3. Вона складається з компенсаційного вимірювального кола, фазочутливого підсилювача сигналу і двофазного асинхронного електродвигуна РД. Вимірювальне коло за схемою не відрізняється від вимірювального кола компенсатора з ручним урівноваженням, але відрізняється конструктивно. Замість зразкового магазину опорів в автоматичному компенсаторі вмонтовано реохорд – змінний резистор з ковзним контактом, який приводиться в рух реверсивним електродвигуном через редуктор. На вихідній осі редуктора закріплена стрілка приладу і перо або олівець, який записує на паперовій стрічці графік зміни в часі вимірюваної величини. Паперова стрічка намотана на барабані, який обертається рівномірно в часі за допомогою синхронного електродвигуна. Таким чином всі зміни температури в технологічному процесі протягом робочого циклу реєструються на паперовому носії.

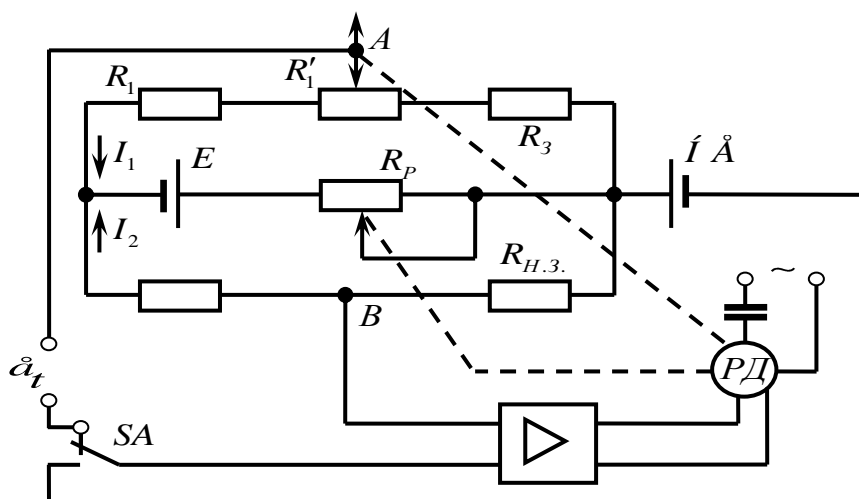


Рис. 11.3. Функціональна схема автокомпенсатора



Прилад працює наступним чином. Спочатку перемикач встановлюють в положення “контроль” і резистором  $R_p$  встановлюють робочий струм  $I_p$ . Потім перемикач SA перемикають в положення ”робота”. Якщо  $I_p \cdot R_{kx} \neq e_t$ , то  $I_p R_{kx} - e_t = \Delta U$ . Ця напруга підсилюється підсилювачем і сприймається електродвигуном РД. Двигун обертає вісь редуктора і переміщує ковзний контакт реохорда до опору, при якому встановиться рівність  $I_p R_{kx} = e_t$ . У цей момент  $\Delta U = 0$ , двигун зупиниться, а стрілка показуватиме відповідну температуру.

### **Контрольні запитання:**

- 1). Що таке міра? Які міри застосовані в компенсаторі?
- 2). Від яких похибок звільняє компенсаційний метод вимірювання?
- 3). Яким є порядок роботи на компенсаторі?
- 4). Які електричні величини і які фізичні величини вимірюють за допомогою компенсатора постійного струму?
- 5). Функціональна схема компенсатора і принцип роботи?
- 6). У якому діапазоні вимірюють напруги серійними компенсаторами постійного струму?
- 7). Як вимірюють опір компенсатором?
- 8). Для яких технологічних вимірювань застосовують автоматичні компенсатори?
- 9). Що ви знаєте про термоперетворювачі ЕРС – термопари, їх типи і застосування.

## РОЗДІЛ XII. МОСТОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ, ІНДУКТИВНОСТІ, ЄМНОСТІ

### 12.1. Міст постійного струму (міст Уїтстона)

Схема моста постійного струму зображена на рис.12.1. Точки  $A, B, C, D$  – вершини моста, кола між суміжними вершинами  $A$  і  $C, B$  і  $D, A$  і  $D, C$  і  $B$  – плечі моста, а кола між протилежними вершинами – діагоналі моста. До одної з діагоналей приєднують джерело живлення з напругою постійного струму  $U$ , в протилежну вмикають вимірювальний прилад – мікроамперметр або гальванометр. Таку схему вперше дослідив англійський фізик Уїтстон в 1855 р.

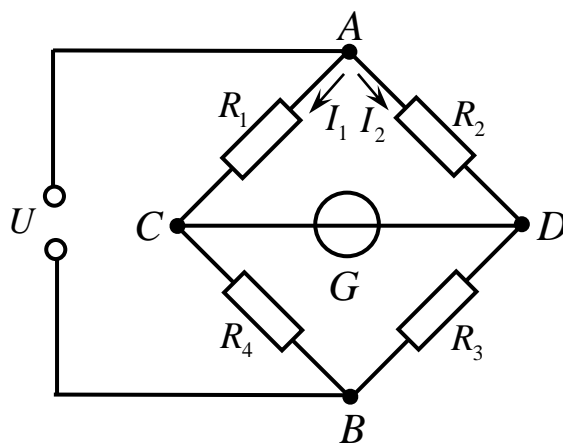


Рисунок 12.1. Схема моста постійного струму

Завдяки тому, що ця схема має характерну властивість, вона отримала широке використання у вимірювальній техніці. Властивість ця полягає в тому, що при певному співвідношенні опорів плечей моста у ній встановлюється режим, при якому,

$$U_{BC} = U_{BD}; I_{CD} = 0, \quad (12.1)$$

тобто режим при якому *струм через прилад дорівнює нулю*. Такий стан мостової схеми називають *урівноваженням*. Розглянемо при якому співвідношенні опорів мостова схема знаходиться в такому стані. Згідно схеми

$$U_{BC} = I_1 R_4; U_{BD} = I_2 R_3; I_1 = U / R_1 + R_4; I_2 = U / R_2 + R_3;$$

отже,

$$U_{BC} = \frac{UR_4}{R_1 + R_4} = U_{BD} = \frac{UR_3}{R_2 + R_3}.$$

З останнього отримуємо

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad (12.2)$$

Це рівняння називають *рівнянням рівноваги* або *рівнянням балансу* моста постійного струму. З цього рівняння можна зробити висновок: якщо в мостовій схемі один опір невідомий, (нехай  $R_4 = R_x$ ), а три інших відомі, то в стані рівноваги значення невідомого опору можна визначити. У даному випадку

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (12.3)$$

Цю властивість мостових схем використовують для вимірювання опорів з високою точністю. Результат вимірювання методом порівняння з мірою не залежить від напруги живлення вимірювального кола, а міри опору технічно реалізовані з високим класом точності – від 0,1 до 0,0001. Отже, цей метод дає можливість вимірювати опори з найвищою точністю.

Вимірювальний міст постійного струму складається з набору зразкових резисторів  $R_1$  і  $R_2$ , підібраних у відношенні  $R_1 / R_2 = 1; 10; 100; 1000$ ; магазину опорів  $R_3$ , гальванометра і джерела живлення – батареї гальванічних елементів або стабілізованого випрямляча. Процес вимірювання починають з того, що вимірюваний резистор  $R_x$  приєднують до затискачів, встановлюють перемикачем одне із значень  $R_1 / R_2 = 1; 10; 100; 1000$ . Спостерігаючи за показом стрілки, підбирають значення, при якому стрілка наближається до нуля. Далі регулюючи опір магазину, стрілку встановлюють на 0. Значення вимірюного опору визначають за виразом (12.3).

Мостові схеми використовують також і у неврівноваженому режимі, як перетворювачі опору в сигнал напруги. У цьому режимі сигнал напруги знімають з вимірювальної діагоналі. Важливою характеристикою мостової схеми є її чутливість. Її визначають як відношення прирощення вихідного сигналу  $\Delta U$  до прирощення опору  $\Delta R_x$

$$S_M = \lim_{\Delta R_x \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta R_x}.$$

Доведено, що максимальна чутливість за напругою мостового кола при вхідному опорі вольтметра, приєднаного до діагоналі  $R_V \rightarrow \infty$  буде при

$$R_1 = R_4 \text{ і } R_2 = R_3.$$

У врівноважених мостах постійного струму нуль-індикатором ставлять магнітоелектричний мікроамперметр або гальванометр. У цьому випадку чутливість моста визначають добутком:

$$S = S_M \cdot S_I = \frac{\Delta I}{\Delta R_x} \cdot \frac{\Delta \alpha}{\Delta I} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta R_x}$$

де  $\Delta I, \Delta \alpha$  - прирощення струму і прирощення кута відхилення стрілки.

При вимірюванні малих опорів  $R_x < 10 \text{ Ом}$  на результат вимірювання впливає опір з'єднувальних проводів, опір та ЕРС перехідних контактів. Для виключення додаткових похибок в одинарних мостах застосовують підключення  $R_x$  за трипровідною лінією, а при вимірюванні дуже малих опорів, менших 1 Ома користуються подвійним мостом.

## 12.2. Подвійний міст для вимірювання малих опорів (міст Томсона)

Вимірювання опорів менших 0,1 Ома одинарним мостом є недоцільним через великі похибки. Для вимірювання малих опорів у діапазоні від  $10^{-6}$  до 10 Ом застосовують подвійні мости постійного струму. Схема подвійного моста зображена на рис. 12.2.

Елемент з вимірюваним малим опором  $R_x$  повинен мати дві пари затискачів – одну пару потужних струмових затискачів, через які він вмикається в коло джерела живлення, і другу пару затискачів потенціальних, між якими вимірюється опір  $R_x$ . Через такі самі затискачі у вимірювальне коло вмикається і зразковий резистор  $R_H$ . Перехідні опори струмових затискачів входять в коло з'єднувального проводу  $R_0$  і проводів, що йдуть до джерела

живлення. Перехідні опори потенціальних затискачів і відповідних з'єднувальних проводів вмикають послідовно з опорами плечей моста  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . Для виключення впливу перехідних опорів і опорів з'єднувальних проводів резистори  $R_1, R_2, R_3, R_4$  вибирають більшими 10 Ом.

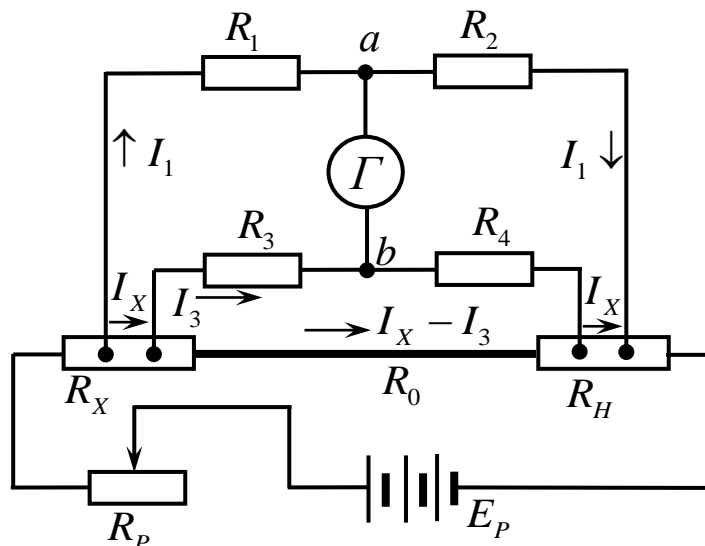


Рис. 12.2. Схема подвійного моста

При рівновазі моста  $I_G = 0$  можна скласти рівняння:

$$I_1 R_1 - I_x R_x - I_3 R_3 = 0.$$

$$I_1 R_2 - I_x R_H - I_3 R_4 = 0.$$

$$I_3 (R_3 + R_4) - (I_x - I_3) R_0 = 0 \text{ або}$$

$$\frac{I_1}{I_x} R_1 - R_x - \frac{I_3}{I_x} R_3 = 0.$$

$$\frac{I_1}{I_x} R_2 - R_H - \frac{I_3}{I_x} R_4 = 0.$$

$$\frac{I_3}{I_x} = \frac{R_0}{R_3 + R_4 + R_0}.$$

Виключимо з останньої трійки рівнянь відношення  $I_1 / I_x$ , отримаємо

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_H + \frac{I_3}{I_x} \left( \frac{R_1 R_4}{R_2} - R_3 \right) \quad (12.4)$$

Підставимо  $I_3 / I_x$  з передостаннього рівняння, отримаємо

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_H + \frac{R_4 R_0}{R_3 + R_4 + R_0} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (12.5)$$

Якщо при регулюванні опорів плечей моста забезпечити виконання умови  $R_1 / R_2 = R_3 / R_4$ , то другий доданок у рівнянні (12.5) дорівнює нулю і отримуємо кінцеву формулу для обчислення вимірюваного опору

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_H. \quad (12.6)$$

Регулювання опорів плечей у подвійних мостах здійснюється таким способом щоб виконувалась вищезгадана умова. Для того кожна пара опорів регулюється одночасно за рахунок механічного зв'язку рукояток магазину опорів. Крім того, виконують умову  $R_0 \approx 0$  тим, що провід, який з'єднує вимірюваний резистор  $R_x$  і зразковий резистор  $R_H$  прокладають найкоротшим і найгрубшим, навіть мідною шиною. Похибки вимірювання малих опорів подвійним мостом вище похибок вимірювання середніх опорів одинарними мостами і можуть у деяких випадках досягати кількох відсотків.

### Контрольні запитання:

- 1). Умова рівноваги мостів постійного струму, її застосування у практиці.
- 2). Від впливу якого фактора залежить результат вимірювання опору мостовим методом?
- 3). За рахунок чого забезпечується висока точність вимірювання опору?
- 4). Як використовують незрівноважені мости?
- 5). Як виключити з результату вимірювання похибку від впливу опору проводів?
- 6). Де і як застосовують автоматичні мости для технологічних вимірювань?
- 7). Що ви знаєте про термоперетворювачі опору, з яких матеріалів їх виготовляють, які їх технічні дані?
- 8). Вимірювальна схема подвійного мосту, умови рівноваги.

## РОЗДІЛ XIII. МОСТИ ЗМІННОГО СТРУМУ

### 13.1. Умови рівноваги моста змінного струму. Мости для вимірювання ємності, індуктивності і активного опору

Схема моста змінного струму в загальному вигляді аналогічна зображеній на рис. 12.1, У загальному випадку плечі моста зображуються у вигляді комплексних опорів  $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3, \dot{Z}_4$ . При напрузі змінного струму міст врівноважений за умови

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_4. \quad (13.1)$$

Виразимо комплексні опори в алгебраїчній формі. Отримаємо умову рівноваги у вигляді

$$(R_1 + jX_1) \cdot (R_3 + jX_3) = (R_2 + jX_2) \cdot (R_4 + jX_4)$$

Перемножимо і отримаємо співвідношення опорів у стані рівноваги

$$\begin{aligned} R_1 R_3 - X_1 X_3 &= R_2 R_4 - X_2 X_4 \\ R_1 X_3 + R_3 X_1 &= R_2 X_4 - R_4 X_2. \end{aligned} \quad (13.2)$$

Отже, в такому вигляді маємо умови рівноваги моста змінного струму, записані у прямокутній системі координат.

Якщо виразимо комплексні опори у показниковій формі, то отримаємо умови рівноваги моста в полярній системі координат

$$Z_1 Z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_2 Z_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)} \quad (13.3)$$

Рівність виконується, якщо

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4; \quad \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \quad (13.4)$$

Міст змінного струму відрізняється від моста постійного струму наявністю **двох** умов рівноваги. Це означає, що для приведення його до стану рівноваги необхідно регулювати не менше двох параметрів моста. Це регулювання здійснюють поетапно, кількома операціями. При різних комбінаціях регульованих елементів кількість почергових операцій

регулювання для досягнення рівноваги різна. Властивість мостів змінного струму, яка відображає кількість кроків необхідних при регулюванні для досягнення рівноваги, називають *збіжністю*. Залежно від того чи входить частота струму живлення у вирази умов рівноваги, чи не входить, мости поділяють на частотно-залежні і частотно- незалежні.

Для прикладу розглянемо мости змінного струму для вимірювання ємності і активного опору та ємності, індуктивності і добротності обмоток.

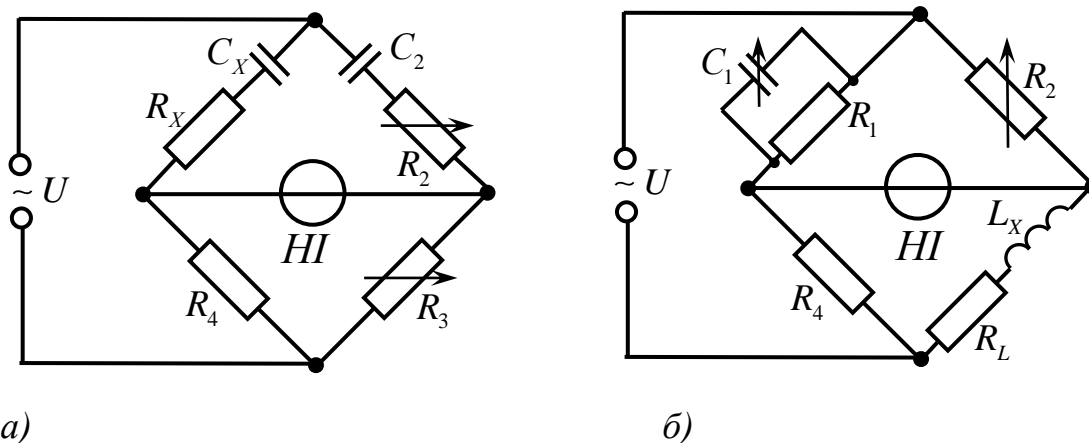


Рис.13.1. Схеми мостів змінного струму: а) для вимірювання ємності і активного опору; б) для вимірювання індуктивності і добротності котушок

Запишемо умови рівноваги моста на схемі а), відомої як “міст Соті”.

$$Z_x R_3 = Z_2 R_4; (R_x - j \frac{1}{\omega C_x}) R_3 = (R_2 - j \frac{1}{\omega C_2}) R_4, \quad (13.5)$$

$$R_x R_3 - j \frac{R_3}{\omega C_x} = R_2 R_4 - j \frac{R_4}{\omega C_2},$$

$$R_x R_3 = R_2 R_4,$$

$$\frac{R_3}{C_x} = \frac{R_4}{C_2}.$$

Отже,

$$R_x = \frac{R_2}{R_3} R_4,$$

$$C_x = \frac{R_3}{R_4} C_2. \quad (13.6)$$

Врівноваження моста виконують регулюванням магазинів опорів  $R_2$  і  $R_3$ .

Схема б) відома під назвою ”міст Максвела”



Умови рівноваги

$$\begin{aligned}Z_1 Z_x &= R_2 R_4 ; \\Z_1 &= \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} ; \\Z_x &= R_L + j\omega L_x ; \\ \frac{R_1(R_L + j\omega L_x)}{1 + j\omega R_1 C_1} &= R_2 R_4 ; \\R_1 R_L + j\omega L_x R_1 &= R_2 R_4 + j\omega R_1 R_2 R_4 C_1\end{aligned}\tag{13.7}$$

Комплексні числа рівні, якщо рівні їх дійсні і уявні частини. Отже,

$$\begin{aligned}R_1 R_L &= R_2 R_4 ; \\R_1 L_x &= R_1 R_2 R_4 C_1 ;\end{aligned}$$

На підставі останнього отримуємо

$$\begin{aligned}R_L &= \frac{R_2}{R_1} R_4 ; \\L_x &= R_2 R_4 C_1.\end{aligned}\tag{13.8}$$

Елементами регулювання є магазин опорів  $R_2$  і магазин ємностей  $C_1$ .

### 13.2. Автоматичний міст змінного струму для вимірювання температури

Для вимірювання і автоматичного контролю температури в технологічних апаратах теплоенергетики, чорної і кольорової металургії, хімії та інших галузей промисловості застосовують давачі температури, принцип дії яких заснований на ефекті температурної зміни електричного опору металів. Такі давачі називають **термоперетворювачами опору** (ТО). Стандартні ТО виготовляють з мідного та платинового дроту. Мідь має температурний коефіцієнт опору (ТКО) – 0,4%/°C, а платина – 0,39%/°C. Отже, стандартний ТО, який при температурі 0°C має опір 100 Ом, при температурі 100°C буде мати опір 140 Ом. Мідні ТО застосовують для вимірювання температур в діапазоні – 50...+200°C, а платинові в діапазоні від –260 до +1100°C.

Функціональна схема автоматичного мосту зображена на рис. 13.2.

Він складається з наступних функціональних елементів: мостової вимірювальної схеми з термометром опору  $R_f$  і реохордом  $R_p$ , фазочутливого підсилювача  $\triangleright$ , електродвигуна  $M$  з редуктором  $P$ , показуючого і реєструючого пристрою.

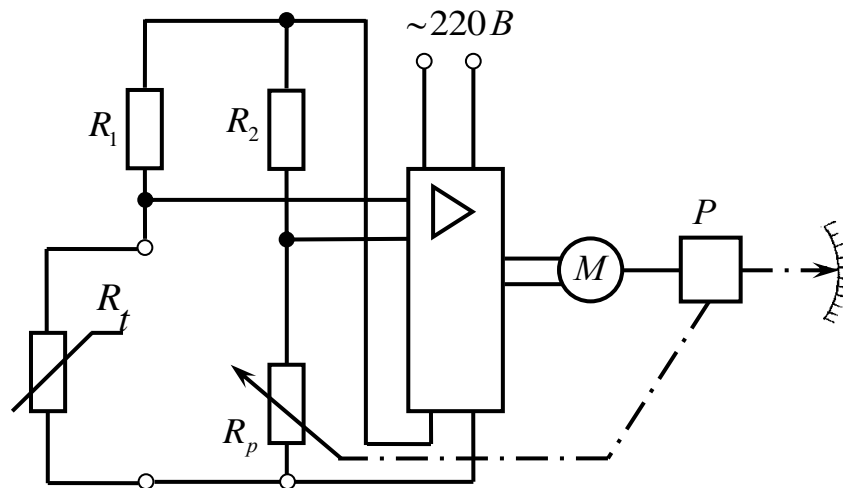


Рис. 13.2. Функціональна схема автоматичного мосту

Елементи стандартних автоматичних мостів конструктивно не відрізняються від складових елементів автоматичних компенсаторів. Різниця тільки у компоновці вимірювальної схеми і напрузі живлення вимірювальної схеми. У автокомпенсаторі вимірювальний сигнал з термопарі є напругою постійного струму, компенсуюча напруга так само є напругою постійного струму. Отже, сигнал небалансу  $\Delta U$  з виходу компенсаційної схеми на вхід підсилювача  $\Pi$  також є сигналом постійної напруги. А сигнал з виходу підсилювача на обмотку керування двофазним реверсивним електродвигуном є сигналом змінного струму з частотою мережі живлення 50 Гц. Значить підсилювач є фазочутливим підсилювачем змінного струму 50 Гц. Тому в автокомпенсаторі сигнал постійної напруги з виходу компенсаційної схеми перетворюється в сигнал змінного струму 50 Гц спеціальним перетворювачем, а потім подається до входу підсилювача. У автоматичному мості вимірювальну схему можна живити напругою змінного струму 50 Гц і сигнал небалансу  $\Delta U$

прямо подавати до входу підсилювача. Тим автоматичний міст відрізняється від компенсатора.

Робота моста відбувається наступним чином. Напруга живлення від мережі подається на підсилювач. З обмотки трансформатора 6,3 В напруга подається на мостову вимірювальну схему. Якщо міст не збалансований, то  $R_1R_p \neq R_2R_t$ , в діагоналі моста з'являється напруга небалансу  $\Delta U$ , яка підсилюється підсилювачем, сприймається електродвигуном і, через редуктор регулює опір реохорда  $R_p$  до значення, при якому міст стає врівноваженим, тобто при якому  $R_1R_p = R_2R_t$ . При цьому  $\Delta U = 0$ , двигун зупиняється, стрілка на осі редуктора показує значення вимірюваної температури.

#### **Контрольні запитання:**

- 1). Умови рівноваги мосту змінного струму в прямокутній системі координат.
- 2). Умови рівноваги моста змінного струму в полярній системі координат.
- 3). Резистивно-ємнісний міст ( міст Соті) та умови його зрівноваження.
- 4). Міст Максвела для вимірювання параметрів котушок індуктивності, умови його врівноваження.

## РОЗДІЛ XIV. ПРИНЦИП РОБОТИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ОСЦИЛОГРАФА

### 14.1. Будова електронно-променевої трубки – ЕПТ

Електронно-променевий осцилограф (ЕПО) – це прилад для візуального спостереження електричних сигналів та для вимірювання їх параметрів. Сигнал – це матеріальне втілення інформації при її передаванні, обробленні і зберіганні. Сигнал відображає зміну в часі деякої фізичної величини, яка характеризує стан або координати об'єкта. Електричні сигнали можуть генеруватися неперервними в часі або у формі імпульсів. Інформативними параметрами сигналів можуть бути амплітуда, частота і фаза напруги, амплітуда і частота імпульсів, тривалість імпульсів і т.і. Основним призначенням осцилографа є відтворення графічного зображення різних електричних сигналів у вигляді осцилограми – залежності напруги або струму від часу у прямокутній системі координат. При цьому вісь Х є віссю часу, а вісь Y – віссю напруги сигналу.

Осциллограф складається з наступних функціональних елементів:

- електронно-променевої трубки;
- блока керування електронним променем;
- блоків формування каналів Х та Y та блоку синхронізації.

Основним елементом осцилографа є електронно-променева трубка (ЕПТ), будова якої зображена на рис. 14.1.

У вузькому кінці вакуумного балона розміщений циліндричний катод, який підігрівається ниткою розжарювання 1, через яку пропускають електричний струм. За допомогою діафрагми 2 з електронів, які випускає катод, формується вузький електронний пучок 5 (електронний промінь). В електричному полі, створюваному між катодом і циліндричним анодом, електрони розганяють до швидкості порядку  $10^4$  км/с. Катод з підігріванням, діафрагма і анод утворюють електронну гармату.

Електронний промінь проходить між двома парами пластин – вертикальних 3 і горизонтальних 4 і попадає на екран 6, покритий люмінофором, речовиною, яка світиться під дією падаючих на нього електронів. У місці падіння променя на екрані з'являється світлова точка.

Якщо подати на вертикальні пластини 3 постійну напругу, напрям електронного променя зміниться і світлова точка зміститься вздовж вертикалі. У випадку змінної напруги електронний промінь коливатиметься у вертикальній площині, а на екрані з'явиться світла вертикальна лінія, довжина якої залежить від значення прикладеної напруги. За довжиною цієї лінії можна знаходити значення дуже слабких напруг і сил струму.

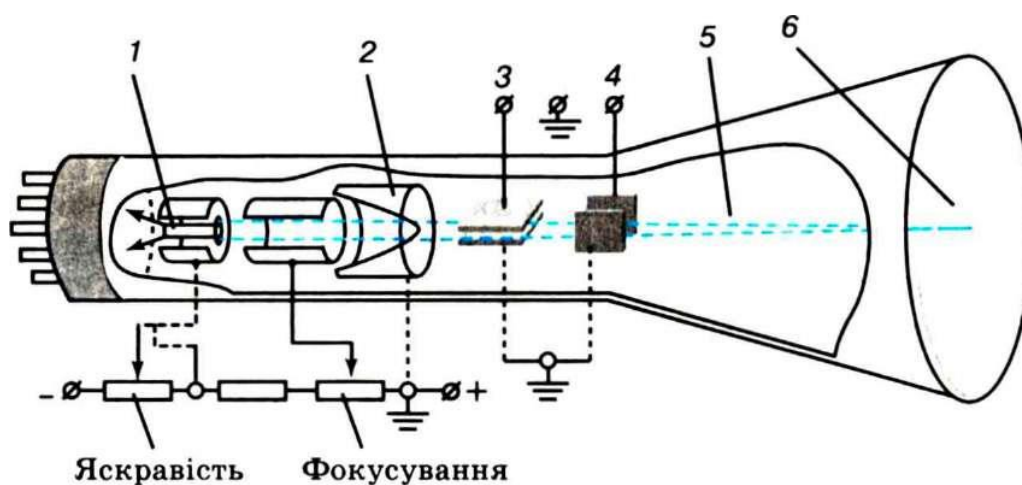


Рис. 14.1. Схематичне зображення ЕПТ

## 14.2. Принцип роботи ЕПТ

Досліджуваний сигнал подають на затискачі вертикальних пластин (Y). Електричне поле між пластинами змінюється за законом зміни електричного сигналу. Нехай на вхід Y подається змінна синусоїдна напруга, яка змінюється за законом  $U_Y = U_m \sin \omega t$ . Напруга між пластинами змінюється за законом синусоїди – від 0 до  $U_m$ , від  $U_m$  до 0, потім від 0 до  $-U_m$  і від  $-U_m$  до 0 і т.д.

У вертикальному напрямі промінь буде переміщатися від точки 1 на рис. 14.2 до верхньої штрихової лінії, потім назад до точки 1, потім від точки 1 до нижньої штрихової лінії і назад до точки 1. В центрі екрану з'явиться

зображення вертикальної лінії довжиною  $h = SU_m$ , де  $S$  - чутливість ЕПТ в мм/В. Щоб отримати зображення сигналу потрібно аби промінь одночасно переміщався з постійною швидкістю в горизонтальному напрямі. Для цього на горизонтальні пластини потрібно подати напругу, яка лінійно зростає за законом  $U_x = ct$ . Цю напругу називають напругою розгортки променя. Вона генерується в осцилографі генератором лінійно зростаючої напруги – ГЛЗН. Щоб зображення було стійким (не рухалось по екрані), період напруги розгортки повинен бути рівним або кратним періоду напруги досліджуваного сигналу. Для того в ГЛЗН є регулятор частоти.

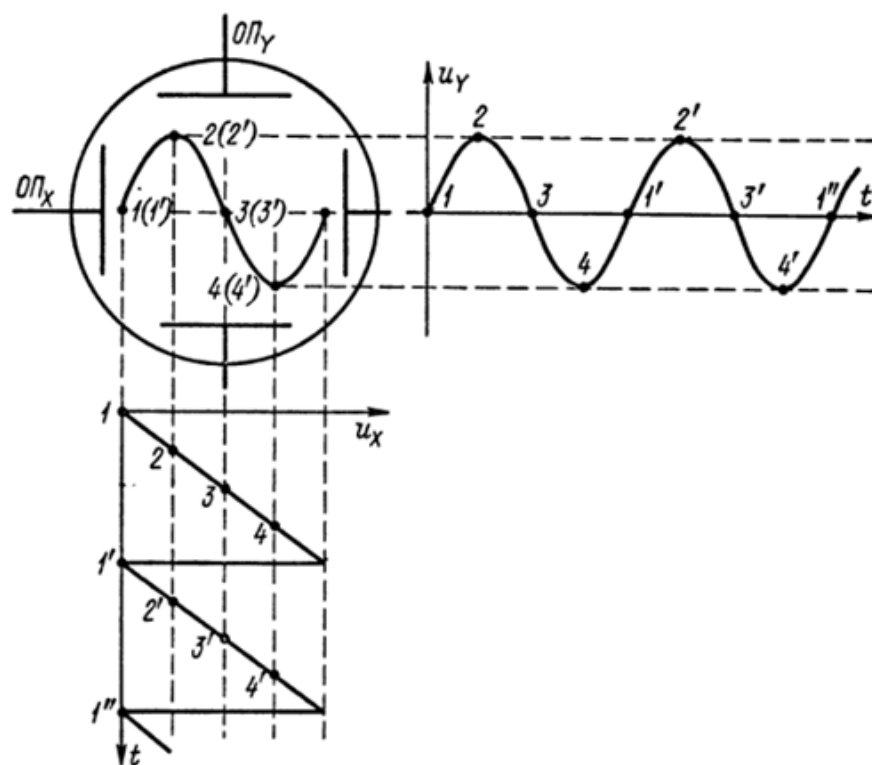


Рисунок 14.2 – Створення зображення на екрані ЕПТ

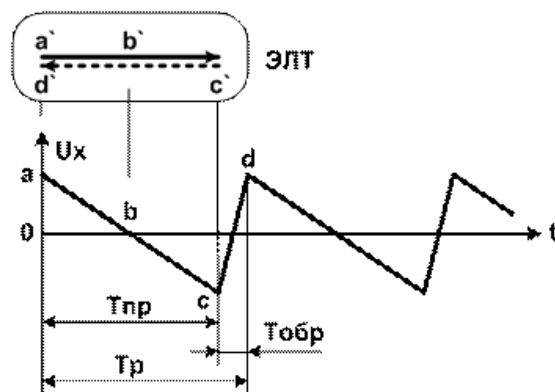


Рисунок 14.3 – Еюра лінійно-зростаючої напруги

Розглянемо спільну дію напруг  $U_X$  і  $U_Y$  на електронний промінь. Нехай періоди напруг будуть рівні,  $T_X = T_Y = T$  і синхронізовані. Розділимо період на 4 рівних частини, як показано на рис.14.2. При  $U_X = 0$  і  $U_Y = 0$  промінь спроектується на екрані в точку 1(1'). Якщо напруга розгортки почне зростати, а напруга сигналу не зміниться, то світлова точка на екрані буде рухатись у горизонтальному напрямі. Але ж напруга сигналу  $U_Y$  також змінюється одночасно з  $U_X$  і веде світлову точку по своєму напрямі, по синусоїді і через четверть періоду приводить її в точку 2(2'). Далі все повторюється і на екрані з'являється зображення синусоїдного сигналу. По закінченні періоду розгортки електронний промінь і його слід на екрані – світлова точка повертається у вихідне положення по прямій 3(3') – 1(1'). Це так званий зворотний хід променя. У наступні цикли розгортки зображення повторюється, тому на екрані ми бачимо нерухоме зображення.

При  $T_Y \neq nT_X$  зображення буде переміщатися по горизонталі. Для отримання нерухомого зображення потрібно регулювати період (частоту) генератора розгортки поки воно не зупиниться. Але через деякий час з-за нестабільності частот генераторів встановлена рівність періодів порушиться зображення знову “попливе”. Щоб цього уникнути, генератор напруги розгортки синхронізують досліджуваною напругою або спеціально сформованим сигналом, частота якого дорівнює частоті досліджуваного сигналу. Синхронізувати – це означає сумістити в часі початок розгортки з початком сигналу.

### **14.3. Функціональна схема електронно-променевого осцилографа**

Функціональну схему електронно променевого осцилографа показано на рис. 14.4. Досліджуваний електричний сигнал подають на гнізда, позначені як Y. Подільником напруги ПНУ величина напруги досліджуваного сигналу знижується до рівня, придатного для підсилення на попередньому підсилювачі ППУ (а це десятки — соті частки вольт) і підсилюється ним, а потім і

підсилювачем вертикального відхилення ПВВ, вихідні затискачі якого з'єднано з пластинами вертикального відхилення електронного променя електронно-променевої трубки ЕПТ. Разом з тим попередньо підсилений досліджуваний сигнал через правий (на схемі) контакт перемикача сигналів синхронізації  $P_{\text{синх}}$  проходить на вхід пристрою синхронізації ПС, а через нього — на генератор розгортки ГР, який генерує напругу пилкоподібної форми, такої, як показано на рисунку. Після підсилення цієї напруги підсилювачем ПГВ, напруга створює між вертикально розташованими пластинами горизонтальної розгортки електричне поле, яке з часом рівномірно збільшуючись, відхиляє електронний промінь. Якщо напруги на гніздах  $Y$  немає, то цей промінь креслить на екрані осцилографа горизонтальну пряму лінію.

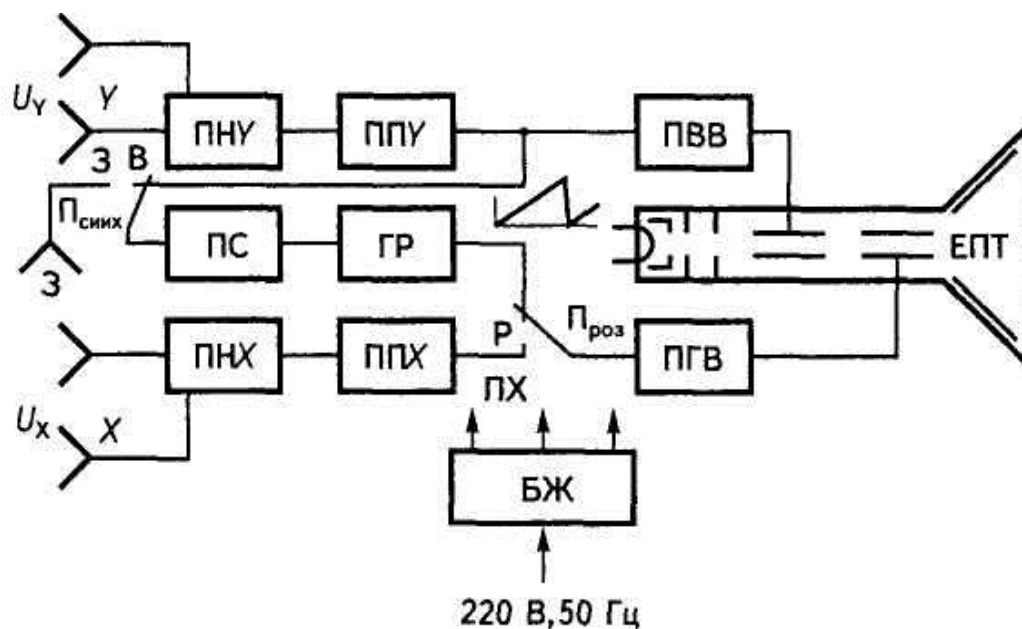


Рис. 14.4. Функціональна схема найпростішого електронно-променевого осцилографа

Якщо ж напруга на гніздах  $Y$  є, то на електронний промінь одразу діятимуть дві взаємно перпендикулярні сили, завдяки чому цей промінь креслитиме залежність напруги, прикладеної до гнізд  $Y$ , від часу, наприклад синусоїду напруги мережі, якщо гнізда  $Y$  з нею десь з'єднані, тощо.

Важливе значення у роботі осцилографа має пристрій синхронізації ПС, який дає змогу за допомогою попередньо підсиленої напруги  $U_Y$  керувати роботою генератора розгортки, а точніше — примушувати його починати



роботу, тобто пересувати електронний промінь упоперек екрана у певний час, наприклад у момент початку збільшення напруги  $U_y$  від нуля у позитивний бік. Це сприятиме тому, що за періодично горизонтальної розгортки всі наступні зображення періодично-змінної напруги точно накладатимуться одне на одне і зображення на екрані буде стійким, як нерухомий рисунок.

При бажанні керувати розгорткою за допомогою зовнішнього сигналу, перемикач синхронізації ( $P_{\text{синх}}$ ) переводять у положення "З" (зовнішня). В цьому разі внутрішній зв'язок між напругою  $U_Y$ , що спостерігається, і розгорткою розривається.

У більшості осцилографів (окрім показаних на схемі перемикачів) є ще перемикач виду розгортки: "періодична-очікуюча". Періодична — це та, що працює весь час роботи осцилографа й синхронізується періодичною досліджуваною напругою  $U_y$  або зовнішніми сигналами.

Очікуюча розгортка — це така, що зовсім не працює за відсутності напруги  $U_Y$ . В цьому разі на екрані є лише світна крапка (звичайно з лівого боку), а розгортка починає діяти лише з моменту появи напруги  $U_Y$ . Такою розгорткою доцільно користуватись при дослідженні випадкових чи імпульсних процесів. Якщо ці процеси не повторюються, то доцільно користуватись осцилографом, у якому електронно-променева трубка має значне післясвічення, бо в разі його відсутності спостерігач не встигає розгледіти подробиці процесу.

Іноді необхідно розглядати водночас дві напруги у взаємодії. У таких випадках перемикач  $P_{\text{роз}}$ , який переводять у нижнє положення, зовсім вимикає розгортку, а на пластини X, що керують променем, подають поділену ПНХ і підсилену підсилювачами ППХ і ПГВ напругу, що надходить із гнізд X.

У цьому разі на екрані електронно-променевої трубки будуть викреслюватись так звані фігури Ліссажу, за якими можна визначити величину кута зсуву фаз між напругами  $U_x$  і  $U_y$ , досить точно виміряти величину частоти невідомого джерела змінного струму

### **Контрольні запитання:**

- 1). Будова і схема живлення ЕПТ.
- 2). Яку функцію виконує модулятор?
- 3) Яку функцію виконують аноди?
- 4). На які пластини подають досліджуваний сигнал?
- 5). Для чого потрібна напруга розгортки, якою є її форма?
- 6). Що таке синхронізація сигналів, як вона здійснюється?
- 7). Як будується форма синусоїдного сигналу?
- 8.) Як вимірюють осцилографом частоту синусоїдного сигналу?

## РОЗДІЛ XV. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

### 15.1. Аналого-цифрове перетворення

**Цифровий вимірювальний прилад (ЦВП)** – це засіб вимірювання, призначений для отримання сигналу вимірювальної інформації у формі цифрового коду, візуально відображеного на екрані.

**Цифровий вимірювальний перетворювач** – засіб вимірювання, призначений для перетворення аналогових сигналів вимірювальної інформації у сигнали цифрового коду. Цифровий вимірювальний перетворювач називають аналого-цифровим перетворювачем або **АЦП**.

Отже, цифровий вимірювальний прилад складається з аналого-цифрового перетворювача і рідинно-кристалічного або газорозрядного індикатора. В АЦП вимірювана величина зазнає дискретизації, квантування за рівнем і кодування.

**Дискретизація за часом** – це процес перетворення неперервного в часі сигналу вимірювальної інформації у дискретну форму. На рис.5.1. наочно показано, що дискретизація за часом здійснюється шляхом відліку неперервного за часом сигналу  $X(t)$  у певні моменти часу  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ . Проміжки часу  $t_1 - t_0 = \Delta t; t_2 - t_1 = \Delta t$  і т.д. називають кроком дискретизації. Якщо  $\Delta t = T = const$ , то  $T$  є періодом дискретизації.

**Квантування** або дискретизація за рівнем полягає у тому, що неперервну за рівнем величину в діапазоні вимірювання замінюють дискретною множиною “квантів” – дрібних неподільних порцій вимірюваної величини, число яких визначає діапазон вимірювання. Значення квантованої величини може бути представлене тільки цілим числом квантів. При квантуванні вимірюваної величини різницю  $\Delta X = X_n - X_{n-1}$  між двома сусідніми дозволеними рівнями називають **кроком квантування**.

Наступним перетворенням сигналу вимірювальної інформації є кодування, тобто представлення числа квантів певним цифровим кодом. Найпростішим кодом у цифровій електронній техніці є одиничний або число-імпульсний код. Це код, у якому число представлено цим же числом імпульсів,

генерованих генератором імпульсів. У ЦВП результат вимірювання представлений на рідинно- кристальному відліковому пристрої у десятковому коді. Перехід від одиничного коду, яким представлено число квантів вимірюваної величини до десяткового числа, зображеного на екрані відлікового пристрою, здійснюється у два кроки. На першому кроці числоімпульсний код перетворюється у двійково-десятковий, на другому кроці двійково-десятковий код перетворюється у десяткове число цифрового відлікового пристрою.

## 15.2. Коди, які застосовують у ЦВП

У ЦВП застосовують коди: одиничний, двійковий, двійково-десятковий і десятковий. Одиничний код – це код, в якому число представлено (записане) тим же числом одиниць. Наприклад, в цьому коді число  $5 = 11111$ , число  $10=1111111111$ . Цей код називають числоімпульсним, бо його фізичною реалізацією є число імпульсів, генероване генератором імпульсів. Одиничний код легко перетворити у двійковий, який є основним при опрацюванні інформації в цифрових обчислювальних машинах (ЦОМ) і ЦВП. У практичній діяльності людство користується десятковою системою числення, тобто десятковим кодом. В ЦОМ числова інформація вводиться десятковим кодом, будь-яка інформація (і числова, і текстова, і зорова, і звукова) в ЦОМ перетворюється і опрацьовується у двійковому коді, числова інформація виводиться в десятковому коді. Десятковий і двійковий коди є кодами позиційної системи числення. У позиційній системі числення кожна цифра, що стоїть на певному місці в числі (на певній позиції) має певний ваговий коефіцієнт – розряд.

**Наприклад:** в числі 782,625

Цифра 2 стоїть у розряді одиниць, тобто  $2 \cdot 10^0$ ;

Цифра 8 ----- десятків,  $8 \cdot 10^1$ ;

Цифра 7----- сотень,  $7 \cdot 10^2$ ;

Цифра 6 ----- десятих  $6 \cdot 10^{-1}$ ;

Цифра 2 -----сотих  $2 \cdot 10^{-2}$ ;

Цифра 5 -----тисячних  $5 \cdot 10^{-3}$ ;

Будь-яке число позиційної системи є сумою добутків цифри, помноженої на ваговий коефіцієнт позиції, яку вона займає в числі.

Так:

$$782,625 = 7 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^1 + 2 \cdot 10^0 + 6 \cdot 10^{-1} + 2 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-3}.$$

В загальному вигляді

$$N_p = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p^0 + a_{-1} p^{-1} + a_{-2} p^{-2} \dots + a_{-n} p^{-n},$$

де  $a_i$  - цифра на позиції  $i$ ;

$p$  - основа коду.

У десятковому коді  $p=10$ ;  $a_i$  = будь-яка цифра з ряду 0;1;2;.....9. У двійковому коді  $p=2$ ;  $a_i = 0$  або 1.

Отже, двійковий код, двійкова система числення є позиційною системою з основою 2 і будь-яке двійкове число можна представити у вигляді суми добутків  $1 \cdot 2^3$ .

$$11011,01 = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} = 27,25.$$

**Алгоритм запису десяткового числа двійковим кодом:**

*цілу частину десяткового числа потрібно послідовно ділити на 2. Якщо десяткове число парне, то проти нього пишемо 0, якщо непарне – 1. Якщо після ділення отримуємо непарне число, то в двійковому числі записуємо 1, якщо парне, то 0. Після останнього ділення отримуємо 1, результат записуємо у зворотному напрямі.*

Приклад:

$$782/2 - 0;$$

$$391/2 - 1;$$

$$195/2 - 1;$$

$$97/2 - 1;$$

$$48/2 - 0;$$

$$24/2 = 0;$$

$$12/2 = 0;$$

$$6/2 = 0;$$

$$3/2 = 1;$$

$$1 = 1. \uparrow$$

Результат записуємо за показом стрілки:

$$782 = 1100001110$$

Перевіримо результат

$$\begin{aligned} 1100001110 &= 1 \cdot 2^9 + 1 \cdot 2^8 + 0 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \\ &= 512 + 256 + 8 + 4 + 2 = 782. \end{aligned}$$

*Дробову частину десяткового числа треба послідовно множити на 2. Якщо результат менше 1, то в двійкове число записуємо 0, а дробову частину множимо на 2, якщо результат більше 1, то в двійкове число записуємо 1, а дробову частину множимо на 2. І так продовжуємо, поки в результаті не отримаємо цілу 1, без дроби, або округляємо результат.*

Результат записуємо за показом стрілки:

$$0,625 \cdot 2 = 1,25 \downarrow$$

$$0,25 \cdot 2 = 0,5$$

$$0,5 \cdot 2 = 1;$$

$$0,625 = 0,101 = 0, +1 \cdot 2^{-1} + 0 \cdot 2^{-2} + 1 \cdot 2^{-3} = 0, +1 \cdot 0,5 + 0 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,125.$$

Вся інформація в цифровій обчислювальній і вимірювальній техніці обробляється в двійковому коді, але числова інформація виводиться на дисплей в десятковому коді. Для переходу від двійкового коду до десяткового використовують двійково-десятковий код. *У двійково-десятковому коді кожен цифру десяткового числа записують двійковим числом.*

Для зображення десяткових чисел потрібно 10 символів: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9. У двійково-десятковому коді кожен з цих символів записується двійковим числом. Для запису всіх цифр від 0 до 9 потрібно 4 розряди двійкового коду.

За правилами запису двійкових чисел крайній правий розряд – це розряд одиниць, тобто його ваговий коефіцієнт  $2^0 = 1$ . Наступні розряди – це  $2^1 = 2; 2^2 = 4; 2^3 = 8$ . У відповідності з ваговими коефіцієнтами цей код називають кодом **8421**, або натуральним двійково-десятковим. Якщо ціну першого зліва розряду змінити з **8** на **2**, отримаємо код **2421**, зручний для технічної реалізації десяткових чисел.

$N_{10}$	Код <b>8421</b>	Код <b>2421</b>
	0000	0000
	0001	0001
	0010	0010
	0011	0011
	0100	0100
	0101	1011
	0110	1100
	0111	1101
	1000	1110
	1001	1111

### Контрольні запитання:

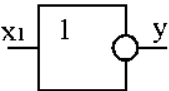
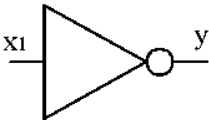
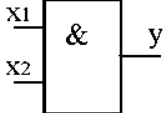

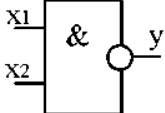

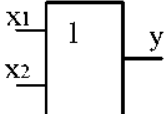
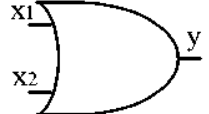
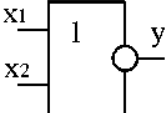

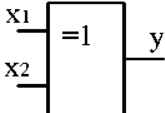

- 1). Властивості позиційної системи числення.
- 2). Одиничний код і його фізичне представлення.
- 3). Двійковий код. Алгоритм запису десяткового числа двійковим кодом.
- 4). Алгоритм запису двійкового числа десятковим кодом.
- 5). Двійково-десятковий код. Двійково-десятковий код 2421.

# РОЗДІЛ XVI. ЕЛЕМЕНТИ І БЛОКИ ЦИФРОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

## 16.1. Логічні елементи і тригери

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) побудовані з елементів і блоків цифрової електроніки. Основними з них є наступні елементи і пристрої:

Таблиця 16.1 – Умовне зображення елементів алгебри логіки.

<i>Назва елемента</i>	<i>Вітчизняні позначення</i>	<i>Міжнародні позначення</i>	<i>Таблиці істинності</i>															
<b>Інвертор</b>			<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>x</math></th> <th><math>y</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	$x$	$y$	0	1	1	0									
$x$	$y$																	
0	1																	
1	0																	
<b>І</b>			<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>x_1</math></th> <th><math>x_2</math></th> <th><math>y</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
$x_1$	$x_2$	$y$																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
<b>І-НЕ</b>			<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>x_1</math></th> <th><math>x_2</math></th> <th><math>y</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
$x_1$	$x_2$	$y$																
0	0	1																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
<b>АБО</b>			<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>x_1</math></th> <th><math>x_2</math></th> <th><math>y</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
$x_1$	$x_2$	$y$																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
<b>АБО-НЕ</b>			<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>x_1</math></th> <th><math>x_2</math></th> <th><math>y</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1
$x_1$	$x_2$	$y$																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
<b>Виключаюче АБО</b>			<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>x_1</math></th> <th><math>x_2</math></th> <th><math>y</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
$x_1$	$x_2$	$y$																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																



- Логічні елементи алгебри логіки – співпадиння або логічного множення (схема **I**), логічного складання (схема **АБО**), заперечення (схема **НЕ**);

- Тригери, лічильники імпульсів, суматори, регістри пам'яті;
- Генератори і формувачі імпульсів;
- Порівнюючі пристрої – компаратори;
- Дешифратори;
- Цифрові відлікові пристрої

Математичною основою сучасної цифрової схемотехніки є арифметика двійкових чисел і алгебра логіки. В алгебрі логіки є три найпростіших операції, які легко можна відтворити елементами електронної техніки і з цих найпростіших елементів створити складніші, такі як тригери, а з тих складніших зробити ще складніші, такі як двійкові і двійково-десяткові лічильники, регістри пам'яті, дешифратори. Ці логічні елементи є тими цеглинами, з яких побудована вся сучасна цифрова обчислювальна і вимірювальна техніка. Інформація в цифрових пристроях передається сигналами двійкового коду – 0 і 1. Головним елементом цифрових інтегральних мікросхем є електронний ключ, який може знаходитися в одному з двох станів. В цифрових інтегральних мікросхемах (ІМС) ці стани відображаються високим – 1, або низьким – 0 рівнем напруги на входах і виходах логічного елемента. За способом кодування сигналів у ІМС їх поділяють на додатну і від'ємну логіки. Для елементів додатної логіки високий рівень напруги відповідає стану логічної 1, а низький рівень напруги відповідає стану логічного 0. Найпростішою логічною функцією є функція **НЕ**, яка називається функцією заперечення, або інверсії. Технічною реалізацією цієї функції є елемент НЕ – електронний ключ, умовно зображений в таблиці 16.1 як інвертор. Таблиця станів елемента показує, що сигнал **у** на виході елемента обернений (інверсний) сигналу **х** на вході. Другий логічний елемент реалізує операцію **I** логічного множення (кон'юнкції). Сигнал 1 на виході елемента **I** з'явиться лише тоді, коли на обидва входи будуть подані сигнали 1. Якщо входів буде більше

двох, то 1 на виході з'явиться лише тоді, коли 1 будуть на всіх входах. Цей елемент в електронних пристроях виконує функцію ключа. Він відкривається тільки після приходу 1 на останній із входів. Наступний логічний елемент **АБО** реалізує функцію логічного складання (диз'юнкції). Він має два або більше входи і один вихід. Таблиця станів показує, що сигнал 1 на виході з'явиться тоді, коли сигнал 1 з'явиться хоч би на одному з входів – вході  $X_1$  або вході  $X_2$ , або навпаки. За допомогою розглянутих логічних схем **НЕ**, **АБО**, **І** можна створювати цифрові пристрої будь-якої складності, наприклад, двійкові і двійково-десяткові лічильники, суматори, регістри пам'яті.

**Тригери.** Елементарною коміркою лічильника є тригер – спусковий пристрій з двома виходами і двома або одним входом. У цифрових вимірювальних приладах застосовують *RS-тригер* і *T-тригер*. *RS*-тригер має два входи –  $R$  і  $S$  і два виходи –  $Q$  і  $\bar{Q}$ . Вихід  $Q$  називають прямим, а  $\bar{Q}$  – інверсним. Якщо подати сигнал, еквівалентний 1 на вхід  $R$ , то тригер встановиться в стан  $Q=0$ , а  $\bar{Q}=1$  і буде знаходитись в цьому стані як завгодно довго, поки не подамо сигнал 1 на вхід  $S$ . Якщо подати сигнал 1 на вхід  $S$ , то тригер перекинеться в стан  $Q=1$ , а  $\bar{Q}=0$  і буде знаходитись в цьому стані поки не подамо сигнал 1 на вхід  $R$ . Повторна подача сигналу 1 на той самий вхід не змінює стану тригера. Це означає, що *RS-тригер* має властивість комірки пам'яті, тобто здатен зберігати записане в ньому однорозрядне двійкове число. В коло з послідовно з'єднаних  $n$  тригерів – регістр, можна записати  $n$ -розрядне двійкове число і зберігати його там як завгодно довго.

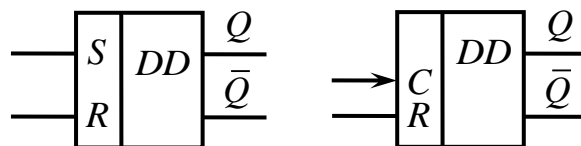


Рис.16.1. Умовне позначення тригерів

Якщо в *RS-тригері* об'єднати разом входи  $R$  і  $S$ , то тригер буде перекидатись у протилежний стан після кожного сигналу 1. Такий об'єднаний

вхід називають лічильним входом, позначають його літерою С (счетный вход), а триггер називають Т-тригером або динамічним тригером. На послідовно з'єднаних Т-тригерах будують двійкові лічильники. Якщо на вхід С кола з  $N$  Т-тригерів подати імпульси з генератора імпульсів, то на виходах  $Q$  тригерів лічильника відобразиться подане число імпульсів у двійковому коді.

### 16.2. Двійковий і двійково-десятковий лічильники

Схема двійкового лічильника, часові діаграми сигналів на його вході і виходах зображені на рис. 16.2. Двійковий лічильник з трьох тригерів заповнюється 7 імпульсами, тобто  $N=2^3 - 1$ . Після 8-го імпульсу всі прямі виходи лічильника “обнуляються” і рахунок повторюється. Лічильник  $n$ -розрядний заповниться числом імпульсів  $N = 2^n - 1$ . Двійковий лічильник перетворює десяткове число, подане на його вхід число-імпульсним кодом у двійкове число, яке відображається станами прямих виходів тригерів, тобто двійковим кодом.

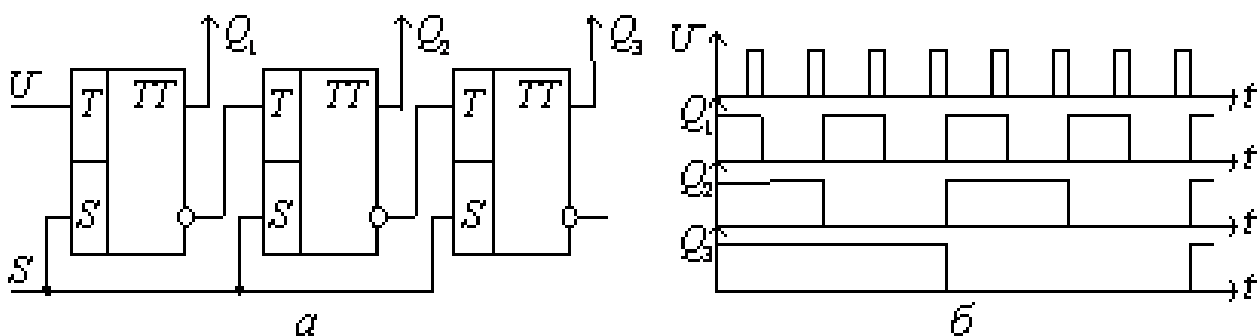


Рис.16.2. Схема двійкового лічильника, часові діаграми сигналів

Таблиця 16.2 – Таблиця станів двійкового лічильника

Вхід	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$Q_1$	0	1	0	1	0	1	0	1	0
$Q_2$	0	0	1	1	0	0	1	1	0
$Q_3$	0	0	0	0	1	1	1	1	0

Двійкове число потрібно зчитувати справа наліво з виходів лічильника або знизу вгору з таблиці 16.2, тобто  $N = Q_3 Q_2 Q_1$ . У цифрових обчислювальних приладах тригерний лічильник використовують також як

подільник частоти імпульсів. З часової діаграми напруг видно, що після кожного тригера частота імпульсів зменшується в два рази. Частота імпульсів на виході  $n$ -розрядного лічильника зменшується в  $2^n$  разів. Це використовується в частотомірах і годинниках з кварцевим генератором.

Для перетворення числа з одиничного коду в десятковий використовують двійково-десяткові лічильники. Схема і таблиця станів прямих виходів двійково-десятькового лічильника зображені на рис.16.3, таблиця 16.3.

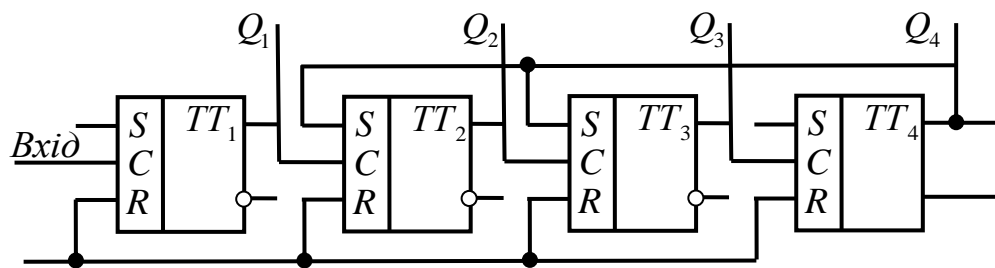


Рисунок 16.3 – Схема двійково-десятькового лічильника в кодi 2421

Таблиця 16.3 – Таблиця станів виходів двійково-десятькового лічильника

Вхід	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
$Q_3$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
$Q_2$	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0
$Q_1$	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Трирозрядний двійковий лічильник рахує тільки до 7. Для кодування всіх десяткових цифр потрібен двійковий лічильник на 4 розряди. Але 4-розрядний лічильник рахує до 16, а потрібно до 10, і на 10 обнулятися. Це відповідає двійково-десятьковому коду **2421**. Цей код можна реалізувати 4-розрядним лічильником з зворотним зв'язком, показаним на схемі рис.16.4. Коло зворотного зв'язку з'єднує вихід 4-го тригера з одиничними входами 2-го і 3-го тригерів. До 8-го імпульсу лічильник працює як трирозрядний двійковий лічильник, після 8-го імпульсу 4-й тригер перекидається з 0 в 1, одночасно по колу зворотного зв'язку надходять сигнали на S-входи тригерів TT2 і TT3, вони перекидаються з "0" в "1". Тому після 8-го імпульсу на виходах лічильника

маємо  $Q_4Q_3Q_2Q_1 = 1110$ . У двійковому лічильнику без зворотного зв'язку реалізується двійково-десятковий код **8421**, у якому  $1110 = 14$ . В лічильнику з зворотним зв'язком реалізується двійково-десятковий код **2421**, у якому  $1110 = 8$ . Після 9-го імпульсу перший тригер перекидається з 0 в 1 і на виходах лічильника отримуємо  $Q_4Q_3Q_2Q_1 = 1111$ , що в коді **2421** дорівнює **9**. Такий лічильник називають декадою. Якщо дві декади з'єднати послідовно, то дводекадний лічильник буде рахувати до 99, тридекадний – до 999 і т. д.

### 16.3. Декодер і знаковий індикатор

В сучасних цифрових вимірювальних приладах результат вимірювання відображається  $n$ -розрядним десятковим числом на відліковому пристрої з семисегментних рідинно-кришталевих індикаторів. Кожна цифра засвічується при певній комбінації сегментів, на які подані сигнали напруги. Комбінації сегментів для кожної цифри визначає **дешифратор** або **декодер** – інтегральна мікросхема з 4-ма входами і 7-ма виходами. Умовне зображення лінійки з послідовно з'єднаних лічильника, дешифратора і знакового індикатора показано на рис. 16.4.

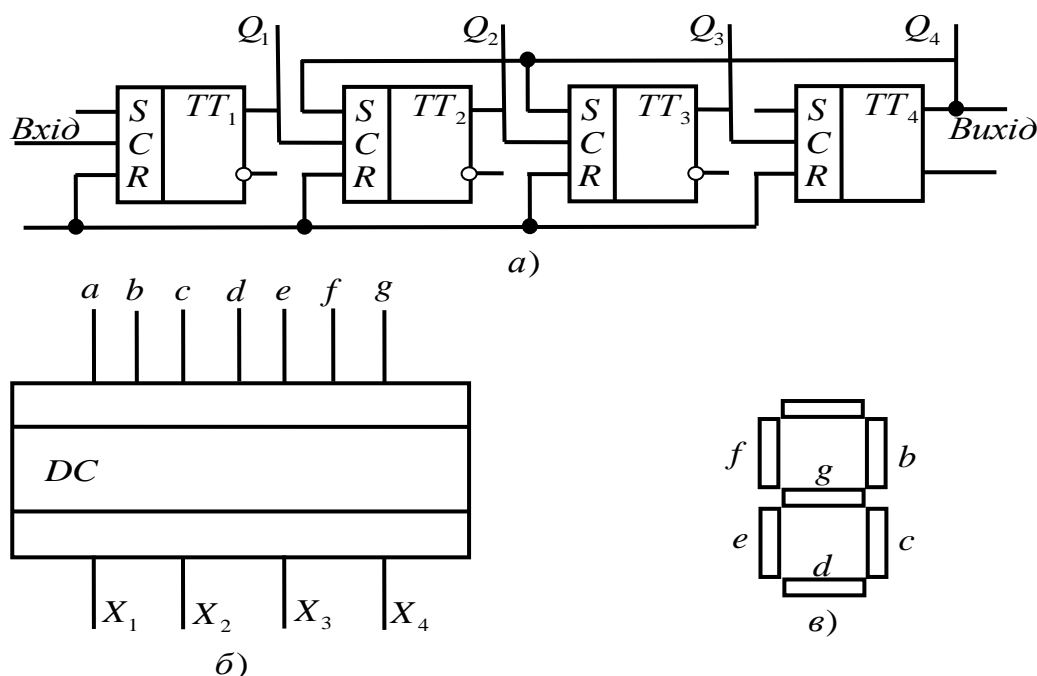


Рис.16.4. Елементи схеми виводу число-імпульсного коду на знаковий індикатор: а) двійково-десятковий лічильник; б) дешифратор; в) знаковий індикатор

Входи декодера DC  $X_1, X_2, X_3, X_4$  приєднуються до виходів лічильника  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  відповідно, а до виходів декодера  $a, b, c, d, e, f, g$  приєднується відповідними входами знаковий індикатор.

З таблиці 16.4 видно, що при відсутності подачі імпульсів на всіх виходах лічильника  $Q_1Q_2Q_3Q_4$  і входах дешифратора  $X_1X_2X_3X_4$  маємо нулі. При нулях на всіх входах дешифратора маємо одиниці на всіх виходах, крім **g**. Всі сегменти, крім **g** світяться і показують цифру **0**. І так кожне число імпульсів, які надходять до входу лічильника, перетворюється у відповідну цифру, яка висвічується на сегментному знаковому індикаторі.

Таблиця 16.4 – Таблиця відповідності виходів входу

Вхід	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_4/x_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
$Q_3/x_3$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
$Q_2/x_2$	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0
$Q_1/x_1$	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
<b>a</b>	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	-
<b>b</b>	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	-
<b>c</b>	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	-
<b>d</b>	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	-
<b>e</b>	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	-
<b>f</b>	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	-
<b>g</b>	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	-

### Контрольні запитання:

- 1) Основні електронні елементи цифрової обчислювальної техніки – НЕ, І, АБО. Алгоритм роботи кожного з них.
- 2). Тригери. Алгоритм роботи статичного і динамічного тригера.
- 3). Двійковий лічильник як перетворювач десяткового коду у двійковий.
- 4). Двійково-десятковий лічильник.
- 5). Двійково-десятковий лічильник з кодом 2421.
- 6). Перетворення десяткової цифри, поданої одиничним кодом, в цифру на знаковому індикаторі – схема послідовно з'єднаних елементів: генератор імпульсів, декада лічильника, декодер, знаковий індикатор.

## РОЗДІЛ XVII. ФУНКЦІОНАЛЬНІ СХЕМИ І ПРИНЦИП ДІЇ ЦИФРОВИХ ВОЛЬТМЕТРІВ І ЧАСТОТОМІРІВ

### 17.1. Цифровий вольтметр часо-імпульсного перетворення

Розглянемо принцип дії та будову цифрового вольтметра (ЦВ), який побудовано за принципом часо-імпульсного АЦП.

Схема ЦВ зображена на рис. 17.1.

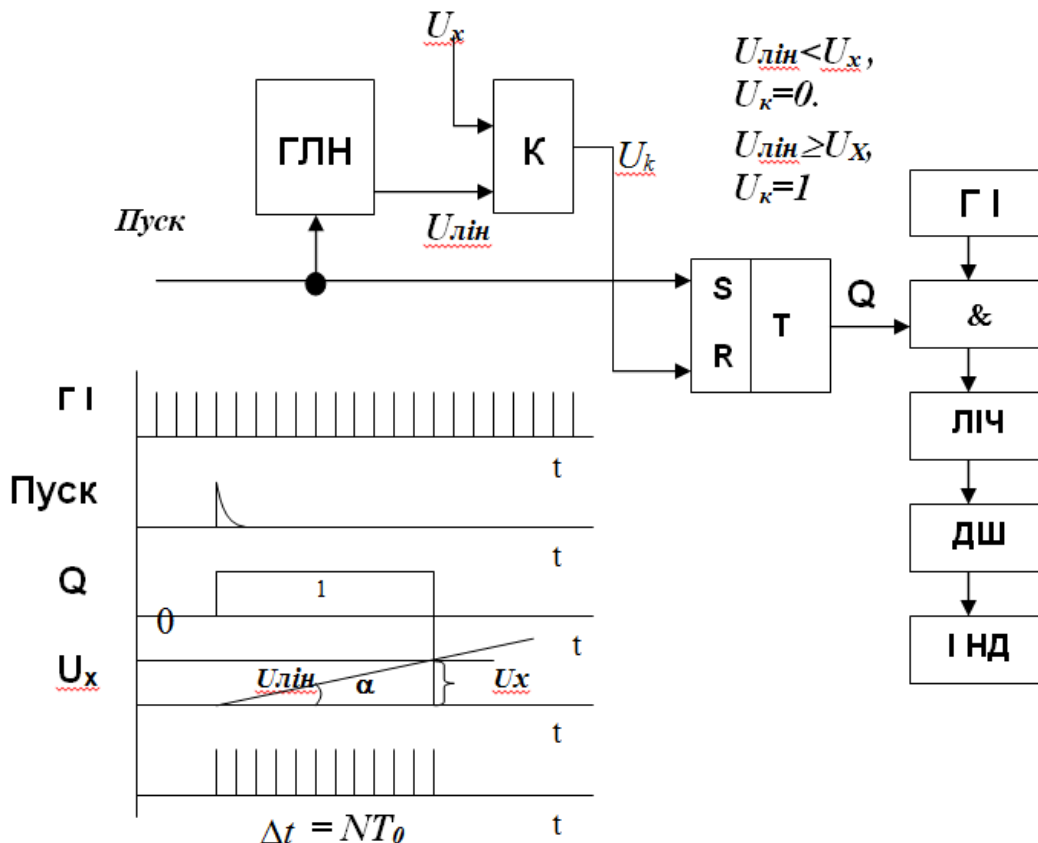


Рис.17.1. Схема і часова діаграма роботи ЦВ.

$ГІ$  – генератор імпульсів одиничного коду з періодом  $T_0$ ;  $ЛІЧ$  – лічильник;  $ДШ$  – дешифратор;  $ІНД$  – індикатор;  $ГЛН$  – генератор лінійно-зростаючої напруги;  $К$  – компаратор

Принцип називають часоімпульсним тому, що при його реалізації значення вимірюваної напруги перетворюється в пропорційний інтервал часу, представлений числом імпульсів. Перед вимірюванням вихідний стан приладу наступний: на виході тригера  $T$  маємо  $Q = 0$ , логічний ключ  $\&$  закритий, імпульси з  $ГІ$  не проходять на лічильник. Після пуску тригер перекидається в стан  $Q = 1$  і одночасно запускається генератор лінійно-зростаючої напруги

ГЛН. Ключ відкривається і імпульси з ГІ проходять на лічильник. Лічильник рахує імпульси з періодом  $T_0$ , напруга  $U_{\text{ліч}}$  зростає. Як тільки напруга ГЛН зрівняється з  $U_x$ , компаратор видає сигнал  $U_k=1$  на нульовий вхід тригера, тригер перекидається в стан  $Q = 0$  і лічильник припиняє рахувати імпульси. За час  $\Delta t$  нараховано  $N$  імпульсів з періодом  $T_0$ , тобто

$$\Delta t = NT_0. \quad (17.1)$$

В той же час

$$U_x = tg\alpha \cdot \Delta t = cNT_0,$$

де  $c = tg\alpha$  – параметр ГЛН.

Отже,

$$U_x = cNT_0, \quad (17.2)$$

тобто число імпульсів, відрахованих лічильником, пропорційне вимірюваній напрузі. Проаналізуємо джерела похибок:

- Похибка дискретності  $\Delta_N$  може бути зроблена як завгодно малою вибором доцільного числа розрядів лічильника;
- Похибка від нестабільності частоти генератора імпульсів  $\Delta_{T_0}$  може бути зменшена застосуванням генератора з кварцевим резонатором;
- Похибка від нестабільності параметрів ГЛН є найбільш суттєвою, але її можна зменшити вибором стабільних  $RC$ -елементів.

Результуюча відносна похибка може бути зменшена до класу 0,01.

## 17.2. Цифровий вольтметр двотактного інтегрування – (ЦВДІ)

Схема ЦВДІ зображена на рис.17.2.

Робота вольтметра відбувається наступним чином. При натисканні кнопки “Пуск” лічильник СТ встановлюється в ”0”, тригери Т1 і Т2 в “1”. Сигнал “1” з прямого виходу Т1 відкриває ключ S1, вимірювана напруга  $U_x$  через замкнений ключ проходить на інтегратор А1, напруга на виході



інтегратора і вході компаратора УС лінійно спадає від  $t_0$  до  $t_1$ , рис.17.2 а), б), в). Одночасно через відкритий ключ И імпульси з генератора G проходять на лічильник СТ, рис.17.2 е).

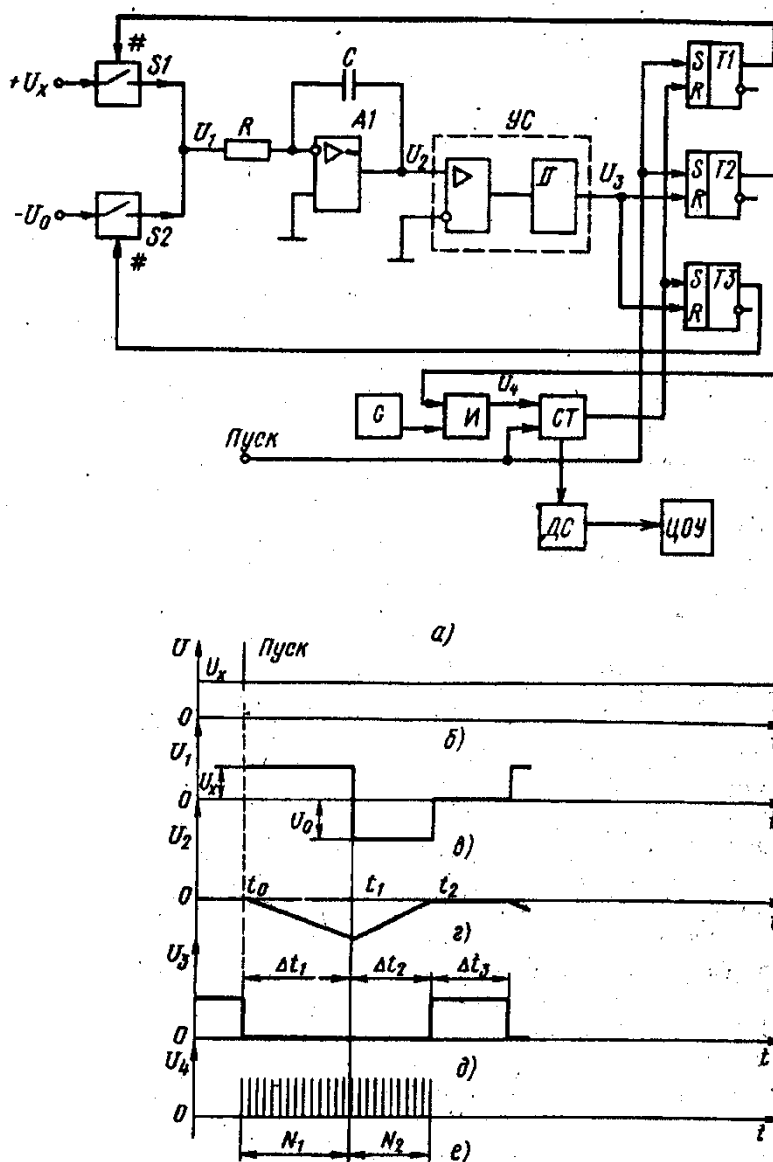


Рис.17. 2. Функціональна схема і часова діаграма напруг цифрового вольтметра двотактного інтегрування:

**T1, T2, T3** – RS-тригери; **СТ** – двійково-десятковий лічильник; **ДС** – дешифратор; **ЦОУ** – цифровий індикатор; **S1, S2, И** – ключі (схеми & на 2 входи); **A1** – інтегруючий ОП; **УС** – підсилювач- компаратор; **G** – генератор імпульсів

Лічильник рахує імпульси до заповнення. Наступним після заповнення імпульсом лічильник обнуляється і цим же імпульсом через тригер T1 розмикає ключ S1, а через тригер T3 замикає ключ S2. З моменту  $t_1$  на вхід інтегратора

подається опорна напруга  $U_0$  полярності, зворотної  $U_x$ . Напруга на виході інтегратора лінійно зростає до моменту часу  $t_2$ . У цей момент компаратор видасть на виході сигнал заповнення. Наступним після заповнення імпульсом лічильник обнуляється і цим же імпульсом через тригер Т1 розмикає ключ S1, а через тригер Т3 замикає ключ S2. З моменту  $t_1$  на вхід інтегратора подається опорна напруга  $U_0$  полярності, зворотної  $U_x$ . Напруга на виході інтегратора лінійно зростає до момента часу  $t_2$ . У цей момент компаратор видасть на виході сигнал “1”, цей сигнал надійде на нульові входи тригерів Т2 і Т3. Тригер Т2 перекинеться у нульовий стан і розімкне ключ И, подача імпульсів з генератора на лічильник припиниться. Таким же чином тригер Т3 розімкне ключ S2, всі елементи крім лічильника, дешифратора і ЦОУ встановляться у вихідний стан. На цифровому індикаторі ЦОУ відобразиться десяткове число, відповідне виміряному значенню напруги  $U_x$ .

Процес зміни напруги на виході інтегратора можна представити рівнянням

$$-\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} U_x dt + \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_0 dt = 0 \quad (17.3)$$

Після інтегрування отримаємо

$$U_x = \frac{U_0}{N_1} N_2 = cN_2 \quad (17.4)$$

Отже, кількість імпульсів  $N_2$ , відрхованих лічильником за другий такт пропорційна вимірюваній напрузі. Висока точність вимірювання забезпечується наступними перевагами:

- 1) високою заводо захищеністю завдяки тому, що тривалість першого такту  $\Delta t_1$  можна вибрати рівною або кратною періоду основної завади;
- 2) метод вимірювання є методом порівняння з мірою – опорною напругою  $U_0$ , джерелом якої може бути стабілізатор високої точності;
- 3) параметри інтегратора  $RC$  не входять в формулу градууювальної характеристики, тому їх нестабільність не впливає на точність;

4) для найвищої точності в генератор імпульсів можна поставити кварцевий резонатор.

### 17.3. Цифровий частотомір

Схема цифрового частотоміра зображена на рис.17.3. Сигнал вимірюваної частоти подають на вхід ФІ2. У вихідному стані  $Q1=0$ ;  $Q2=0$ , логічні ключі &1 і &2 – закриті, імпульси вимірюваної частоти  $f_x$  на лічильник не проходять. Після пуску тригер Т1 перекидається в стан  $Q1=1$ , ключ &1 відкривається і перший імпульс, сформований із синусоїдної напруги кварцевого генератора, проходить на лічильний вхід тригера Т2, який перекидається в стан  $Q2=1$  і відкриває ключ &2. Імпульси вимірюваної частоти  $f_x$  з виходу ФІ2 проходять на лічильник. Формувач імпульсів ФІ1 з синусоїдної напруги кварцевого генератора формує послідовність імпульсів з частотою  $f_{кв}$ . Подільник частоти ділить частоту у  $2^n$  або у  $10^n$  разів. Ділення частоти означає множення періоду. Отже, якщо частота напруги кварцевого генератора дорівнює  $10^6$  Гц, а коефіцієнт ділення частоти дорівнює  $10^6$ , то імпульси з подільника частоти будуть проходити з періодом 1с. Другий імпульс, сформований з напруги кварцевого генератора, перекидає тригер Т2 у стан  $Q2=0$ , сигнал з його інверсного виходу перекидає тригер Т1 в стан  $Q1=0$ , ключі &1 і &2 закриваються, схема повертається до вихідного стану. Якщо період послідовності імпульсів з подільника частоти дорівнює 1 сек, то число імпульсів, відрахованих лічильником, дорівнює абсолютному значенню частоти  $f_x$ . Для мінімізації похибки число розрядів цифрового індикатора доцільно вибирати таким, щоб останній розряд дорівнював 1 імпульс/с. Тоді найменша похибка буде на верхній частоті діапазону, а при зменшенні частоти похибка зростає. Щоб не втратити точність на низьких частотах від вимірювання частоти сигналу переходять до вимірювання періоду. Цим же приладом можна вимірювати період  $T_x$ , якщо кварцевий генератор перекинути на вхід ФІ 2, а вимірюваний сигнал  $f_x$  – на вхід ФІ 1.

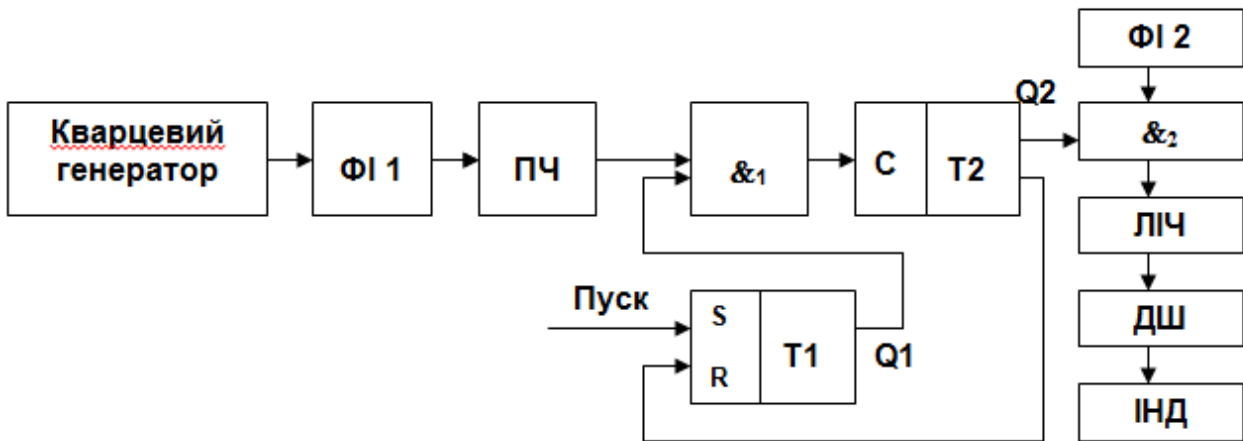


Рис. 17.3. Функціональна схема цифрового частотомера **ФІ 1, ФІ 2** – формувач імпульсів; **ПЧ** – подільник частоти

### Контрольні запитання:

- 1). Функціональна схема і алгоритм роботи цифрового вольтметра часо-імпульсного зрівноваження.
- 2) Алгоритм роботи компаратора.
- 3). Яким елементом схеми визначається точність вольтметра?
- 4). Функціональна схема і алгоритм роботи цифрового вольтметра з двотактним інтегруванням.
- 5). Якими факторами забезпечується висока точність ЦВДІ?
- 6). Функціональна схема і алгоритм роботи цифрового частотомера.
- 7) Функціональна схема і алгоритм роботи цифрового частотомера в режимі вимірювання періоду.
- 8). Яким елементом схеми визначається точність частотомера?

## РОЗДІЛ XVIII. ЕЛЕКТРОННІ І ЦИФРОВІ ЛІЧИЛЬНИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

### 18.1. Однофазні електронні і цифрові лічильники

Перший зразок індукційного лічильника (**ІЛ**), розроблений і запатентований угорським інженером Отто Тітусом Блаті в 1889 р. важив 23 кг, сучасний однофазний індукційний лічильник **СОИ-2**, який за принципом дії є таким самим, важить  $\approx 1$  кг. Більше як за 100 років використання ІЛ їх було виготовлено і впроваджено десятки, а може й сотні мільйонів зразків. Їх конструкція, надійність і точність доведена до верхньої межі досконалості. В Україні, Росії та інших країнах зони СРСР однофазний індукційний лічильник з класом точності 2,5 і 2,0 ще й тепер є основним приладом обліку енергії побутових споживачів і використовується в десятках мільйонів штук. На фоні сучасного прогресу електроніки і освоєного промисловістю випуску дешевих електронних лічильників з класом точності 0,5 – 1,0 використання в експлуатації ІЛ видається анахронізмом. І цей анахронізм пояснити можна тільки тим, що постачальники енергії не зацікавлені в підвищенні точності обліку. Не зважаючи на це, техніка невпинно прогресує і, наразі не тільки відомі електротехнічні фірми Європи, США і Японії, але й заводи Росії і України виготовляють досить широку номенклатуру електронних лічильників класу 1,0. Розглянемо варіанти схемних реалізацій електронного лічильника.

Як відомо, побутовий лічильник обчислює активну електроенергію за формулою

$$W_a = \int_0^t I \cdot U \cdot \cos \varphi dt \quad (18.1)$$

Тому він складається з двох конструктивних вузлів – перемножувача двох векторів напруг та інтегратора. Перемножувач напруг можна назвати перетворювачем потужності в напругу – **ППН**, а інтегратором може бути електромеханічний лічильник імпульсів – **ЕМЛ** або цифровий лічильник – **ЦЛ**. В обох випадках для роботи лічильника неперервний сигнал напруги

пропорційний потужності необхідно перетворити в послідовність імпульсів з частотою, пропорційною потужності. Для того потрібен ще один функціональний елемент – перетворювач напруги в частоту імпульсів – **ПНЧ**. Конструктивно його об'єднують з ППН. Отже, можливі наступні варіанти схемної реалізації електронних лічильників:

1. Аналоговий ППН + аналоговий ПНЧ + аналоговий ЕМЛ;
2. Цифровий (ППН+ПНЧ) в одній інтегральній мікросхемі (ІМС) + аналоговий ЕМЛ;
3. Цифровий (ППН+ПНЧ) в одній ІМС + цифровий лічильник ЦЛ з енергонезалежною пам'яттю в окремій ІМС;
4. Програмований логічний контролер – **ПЛК**, об'єднуючий в одній мікросхемі функції ППН, ППЧ, ЦЛ по одному або кількох каналах.

Для однофазних аналогових лічильників за першим варіантом завод “Кристалл” (м. Київ) розробив ІМС **UA01**. Перемноження двох величин ( $I \cdot U$ ), перетворених у нормовані сигнали напруг, в ІМС **UA01** здійснюється операційними підсилювачами за принципом “логарифм-антилогарифм”. Далі напруга, пропорційна добутку  $I \cdot U$  перетворюється в частоту імпульсів струму, які подаються на електромеханічний лічильник. Одною з проблем електронного лічильника є збереження інформації при пропаданні напруги. При застосуванні механічного або електромеханічного лічильника цієї проблеми не існує.

Другою проблемою електронних лічильників є обмеження ГОСТ 30207-94 на потужність споживання колами струму (не більше 2 ВА) і напруги (не більше 4 ВА). Конструкторами-розробниками і заводами ці проблеми успішно подолані і на українському ринку електротоварів широко рекламуються такі моделі електронних лічильників, як: **СО-ЭА05М1**; **СО-ЭА05Р**; **СО-ЭАК3М** (м.Харків, ВО “Комунар”), **ЦЭ-6807Б**; **ЦЭ6807П**; **ЦЭ6804 1Т** (Росія, ВАТ “Энергомера”), однофазні та трифазні лічильники НІК 2102 та ін. Перелічені вище типи однофазних лічильників реалізовані за другим варіантом – перетворення  $I \cdot U$  в цифровий сигнал та аналого-цифрове, інтегрування – електромеханічне. Типовою реалізацією цього методу є лічильник **СО-ЭА05Р**.

Цей лічильник розроблено у відповідності з міждержавним ГОСТ 30207- 94, який відповідає стандартам Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК).

Лічильники **СО-ЭА05Р** і **СО-ЭА05М1** призначені для вимірювання активної енергії в однофазних двопровідних колах змінного струму. Вони мають наступні технічні характеристики:

- Номінальна напруга – 220 В;
- Номінальний і максимальний струм – 5 (50) А;
- Клас точності 1,0;
- Передаточне число – 3200 імп./кВт·год;
- Поріг чутливості – 20 мА;
- Середній термін служби – 30 років;
- Напрацювання на відмову – 160000 год.;
- Міжповірочний інтервал – 16 років;
- Маса – 0,9 кг.

Основою лічильника є ІМС **ADE 7755** або **ADE 7757** фірми Analog Devices. Аналогова частина цієї мікросхеми складається з сігма-дельта модулятора і джерела опорної напруги. Сигнал модулятора перетворюється АЦП в цифровий код, який обробляється в цифровій частині і перетворюється в сигнали електромеханічного лічильника Meter Drum Counter на 7 десяткових розрядів. Функціональна схема ІМС **ADE 7755** зображена на рис.18.1.

Лічильник **СО-ЭА05Р** виготовляють в корпусі лічильника СОИ-2, його ціна – 165 грн. у 2013р.

І нарешті повністю цифровий однофазний лічильник, реалізований по варіанту 4, побудований за схемою, зображеною на рис. 18.2.

Лічильник працює наступним чином. Нормовані сигнали від давачів струму і напруги навантаження подаються до входів перетворювача потужності в частоту імпульсів ІМС КР1095ПП1. З виходу ІМС сигнал потужності, пропорційний частоті імпульсів надходить до входу мікроконтролера МС68НС05КJ1, який рахує ці імпульси і перетворює їх кількість в кВт·год. Виміряні значення енергії послідовно записуються у флеш-пам'яті і

висвічуються на цифровому індикаторі РКІ. При пропаданні енергії накопичена інформація зберігається у флеш-пам'яті.

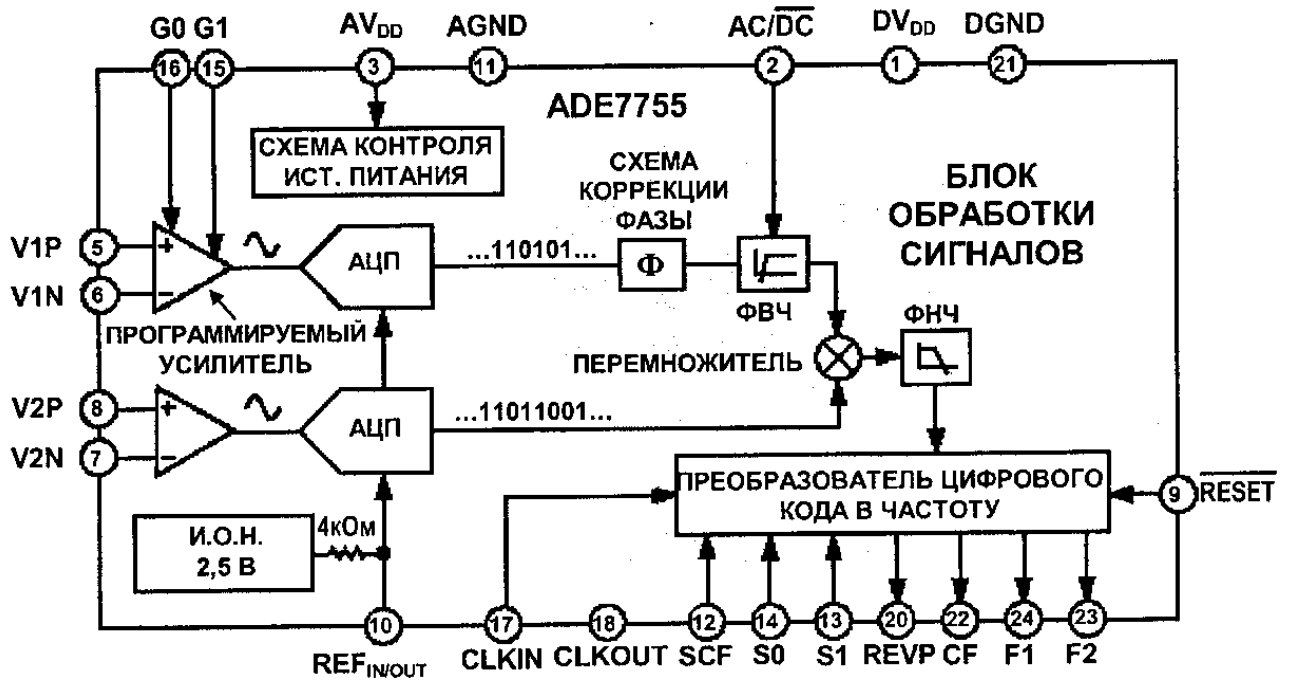


Рис. 18.1. Функціональна схема ІМС ADE 7755

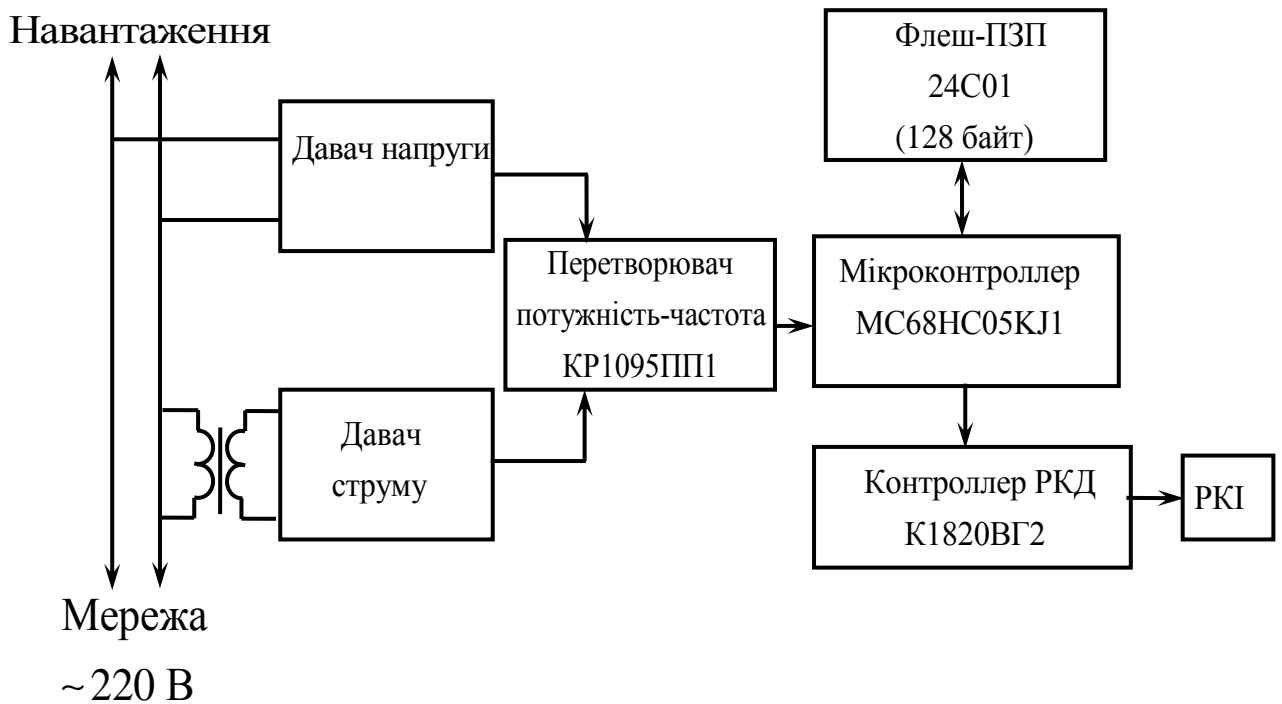


Рис. 18.2. Функціональна схема однофазного цифрового лічильника



## 18.2. Трифазний електронний лічильник

Широку номенклатуру однофазних і трифазних лічильників виготовляє фірма НІК (м.Київ). Для прикладу розглянемо однотарифний трифазний лічильник **НІК 2303 АРП 1**. Він виконаний за 4-м варіантом схемної реалізації електронних лічильників, тобто він є повністю цифровим. Його функціональна схема зображена на рис. 18.3.

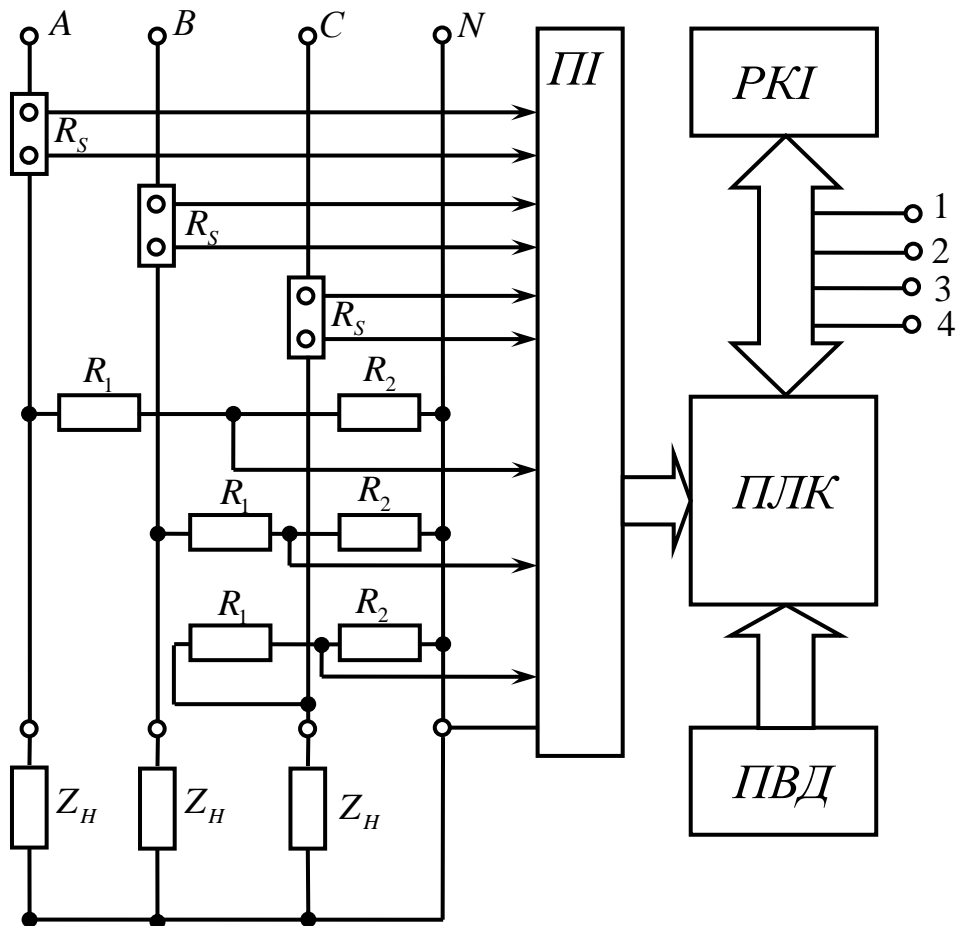


Рис.18.3. Схема функціональна трифазного триелементного цифрового лічильника електроенергії з прямим підключенням до мережі.

$Z_H$  - опір навантаження;  $R_S$  - шунт;  $R_1 R_2$  - подільник напруги;  $\Pi$  – приладовий інтерфейс;  $\text{ПЛК}$  – програмований логічний контролер;  $\text{РКІ}$  – рідинно-кристалічний індикатор;  $\text{ПВД}$  – пульт вводу даних параметризації; **1,2,3,4** – виводи на канали передачі інформації (електричний аналоговий, імпульсний, оптичний, радіоканал).

Вимірювання активної і реактивної електроенергії виконується шляхом аналого-цифрового перетворення сигналів струму і напруги, які вимірюються первинними перетворювачами і подаються до входу АЦП, вмонтованому в **ПЛК**. З виходу АЦП ці сигнали, перетворені в цифровий код, подаються до входу **ПЛК** – програмованого логічного контролера, який обчислює наступні параметри:

- Середньоквадратичні значення струмів, напруг, потужності, потічне значення коефіцієнта потужності по кожній фазі (лічильник триелементний);
- Значення активної і реактивної енергії сумарно і по кожному тарифу.

Обчислені значення параметрів ПЛК передає на **РКІ** – рідинно-кристалічний індикатор і в енергонезалежну флеш-пам'ять. ПЛК керує також електричними і оптичними інтерфейсами, радіоканалом та імпульсними виходами. В лічильниках використовується семисегментний РКІ на 9 розрядів (6 розрядів до коми і 3 – після коми). Виміряні і обчислені значення параметрів при відсутності напруги на затискачах лічильника повинні зберігатися не менше 20 років. Функціональна схема лічильника зображена на рис. 18.3, а схема приєднання до мережі – на рис.18.4. Основні технічні характеристики лічильника наступні:

- Клас точності при вимірюванні активної потужності – 1.0;
- Клас точності при вимірюванні реактивної потужності – 2.0;
- Номінальний струм – 5 А;
- Максимальний струм – 60; .....А;
- Номінальна напруга ;
- Допустиме відхилення напруги від номінального значення – від -20 до +15 % ;
- Номінальна стала по активній потужності – 8000 імп/(квт·год);
- Номінальна стала по реактивній потужності – 8000 імп/(квар·год);
- Активна потужність, споживана кожним вимірювальним колом напруги при номінальній напрузі – не більше 2 Вт;

- Повна потужність, споживана колом струму при номінальному струмі – не більше 0,05 ВА;
- Встановлений робочий діапазон температури – від  $-35^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ ;
- Міжповірочний інтервал – не більше 6 років.

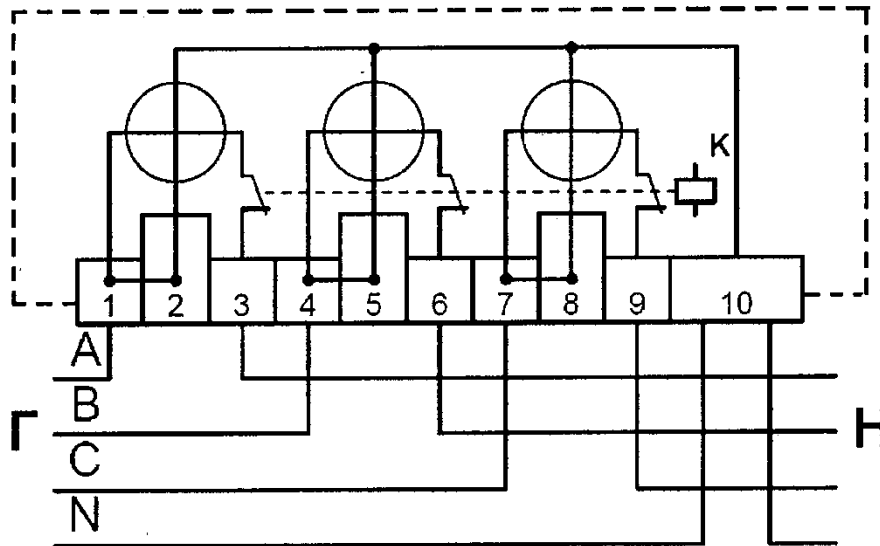


Рис.18.4. Схема приєднання до мережі споживача лічильників **НІК 2303** прямого підключення (модифікації 2303 АП1, АП2, АП3, АП6, АРП1, АРП2)

### Контрольні запитання:

1. Що означає пряме і непряме приєднання лічильника до мережі?
2. Які технічні вимоги ДСТУ 30207-94 до порогу чутливості лічильників електроенергії?
3. Які технічні вимоги ДСТУ до енергоспоживання в ланцюгу струму лічильників електроенергії?
4. Які технічні вимоги ДСТУ до енергоспоживання в ланцюгу напруги лічильників електроенергії?
5. З яких функціональних елементів складається аналоговий електронний лічильник?
6. З яких функціональних елементів складається цифровий електронний лічильник?
7. Назвіть технічні характеристики трифазного лічильника НІК 2303.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Воронцов-Вельяминов, Б. А. Лаплас [Текст] : научное издание / Б. А. Воронцов-Вельяминов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Наука, 1985. - 286 с.
2. Власов, А. Д. Единицы физических величин в науке и технике [Текст] : справочник / А. Д. Власов. - М. : Энергоатомиздат, 1990. - 176 с.
3. Камке, Д. Физические основы единиц измерения [Текст] : пер. с нем. / Д. Камке, К. Кремер ; ред. А. Н. Матвеев ; пер.: В. Е. Маркевич, Н. В. Мицкевич. - М. : Мир, 1980. - 208 с.
4. Метрологія та вимірювальна техніка [Текст] : підручник / [Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук та ін.] ; за ред. : Є. С. Поліщук ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - 2-е вид., допов. та перероб. - Львів : Львівська політехніка, 2012. - 541 с.
5. Метрологія. Терміни та визначення. ДСТУ 2681-94 [Текст] : стандарт. - Офіц. вид. - К. : Держстандарт України, 1994. - 15 с.
6. Державна система забезпечення єдності вимірювань" ДСТУ 2682-94 [Текст] : стандарт. - Офіц. вид. - К. : Держстандарт України, 1994. - 68 с.
7. Дудюк Д. Л. Електричні вимірювання [Текст] : навч. посіб. / Д. Л. Дудюк, В.М. Максимів, Р.Я. Оріховський ; М-во освіти і науки України, Наук.-метод. центр вищ. освіти, Укр. держ. лісотехн. ун-т. 2-е вид., випр. - Львів : Афіша, 2003. - 265 с.
8. 8. Еріванцев І. М. Електричні вимірювання [Текст] : навч. посібник для інженер. спец. вузов / І. М. Еріванцев, В. В. Коваль. - Дніпропетровськ : Дніпр-ська книжк. друкарня, 1998. - 512 с.
9. Электрические измерения [Текст] : учебник / Л. И. Байда [и др.] ; ред.: А. В. Фремке, Е. М. Душин. - 5-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергия, 1980. - 392 с.
10. Электрические измерения (с лабораторными работами) [Текст] : учебник / Р. М. Демидова - Панферова [и др.] ; ред. В. Н. Малиновский. - М. : Энергоатомиздат, 1982. - 392 с.

11. Электрические измерения. Общий курс [Текст] : учебник для студентов электроэнергетических и электротехнических специальностей вузов / Ред. А.В. Фремке. - 4-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергия, 1973. - 424 с.
12. Электрические измерения (с лабораторными работами) [Текст] : учебник для средних специальных учебных заведений / Р.М. Демидова-Панферова, В.Н. Малиновский, В.С. Попов и др.; Ред. В.Н. Малиновский. - М. : Энергоиздат, 1982. - 391 с.
13. Основи метрології та електричних вимірювань: Конспект лекцій для студентів спеціальності 7.090603 всіх форм навчання. Укладач: доцент Решетник В. Я., ТНТУ ім.Івана Пулюя, Тернопіль, 2013 р.
14. Котур В. И. Электрические измерения и электроизмерительные приборы [Текст] : учеб. пособие для электромех. и приборостроит. техникумов / В. И. Котур, М. А. Скомская, Н. Н. Храмова. - М. : Энергоатомиздат, 1986. - 400 с.
15. Тарасова В. В. Метрологія, стандартизація і сертифікація [Текст] : підручник для студ. вузів / В. В. Тарасова, А. С. Малиновський, М. Ф. Рибак. - К. : Центр навчальної літератури, 2006. - 264 с.