

Міністерство освіти і науки України  
Таврійський державний агротехнологічний університет

НЕСТЕРЧУК Д.М.

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Мелітополь

**Міністерство освіти і науки України  
Таврійський державний агротехнологічний університет**

**НЕСТЕРЧУК Д.М.**

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА  
ТА МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*Рекомендовано методичною комісією  
факультету інженерії та комп'ютерних технологій  
Таврійського державного агротехнологічного університету  
як навчальне видання для підготовки здобувачів  
ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 133  
«Галузеве машинобудування»*

**Мелітополь  
2019**

**УДК 621.3 (078)**  
**H55**

**Укладач:**

**Нестерчук Д.М.**, доцент кафедри «Електротехніка та електромеханіка імені професора В.В. Овчарова» Таврійського ДАТУ

**Рецензенти:**

**Нестерчук Д.М.**

**H55** Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: конспект лекцій/ Д.М.Нестерчук. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. - \_\_\_\_ с.

**ISBN**

В конспекті лекцій з дисципліни «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка» зібраний, систематизований та наочно викладений теоретичний матеріал з електротехніки: основні поняття і закони електричних та магнітних кіл; співвідношення електричних та енергетичних величин; конструкція принцип дії, характеристики та принципи керування трансформаторами, електровимірювальними приладами, електричними апаратами, електричними машинами постійного та змінного струму. У частині з електроніки подана інформація щодо напівпровідникових приладів, перетворювальної та мікропроцесорної техніки.

© Нестерчук Д.М.  
© «Таврійський державний  
агротехнологічний університет», 2019

## ЗМІСТ

Передмова	6
<b>Лекція 1</b>	7
<b>Тема 1 Лінійні електричні кола постійного струму</b>	
1.1 Явище електризації тіл і закон збереження заряду	7
1.2 Явище взаємодії заряджених тіл і закон Кулона	8
1.3 Явище електричного струму і закон Ома	11
1.4 Електричне коло і його елементи	13
<b>Лекція 2</b>	16
<b>Тема 1 Лінійні електричні кола постійного струму</b>	
1.5 Явище теплової дії електричного струму і закон Джоуля-Ленца	16
1.6 Розрахунок нерозгалуженого електричного кола	17
1.7 Закони Кірхгофа та їх застосування для розрахунку розгалужених кіл	21
1.8 Еквівалентні перетворення схем з'єднань опорів	24
Контрольні запитання до теми 1	28
Список літератури для вивчення теми 1	29
<b>Лекція 3</b>	
<b>Тема 2 Нерозгалужені електричні кола змінного синусоїдного струму</b>	30
2.1 Основні фізичні поняття	30
2.2 Коло змінного синусоїдного струму з резистором	34
2.3 Коло змінного синусоїдного струму з ідеальною котушкою	37
2.4 Коло змінного синусоїдного струму з ідеальним конденсатором	40
<b>Лекція 4</b>	
<b>Тема 2 Нерозгалужені електричні кола змінного синусоїдного струму</b>	43
2.5 Реальна котушка в колі змінного синусоїдного струму	43
2.6 Коло змінного синусоїдного струму з резистором і конденсатором	45
2.7 Коло змінного синусоїдного струму з послідовно з'єднаними котушкою і конденсатором	48
2.8 Резонанс напруг	51
2.9 Лінія електропередачі	53
Контрольні запитання до теми 2	56
Список літератури для вивчення теми 2	58
<b>Лекція 5</b>	59
<b>Тема 3 Трифазні електричні кола синусоїдного струму</b>	
3.1 Трифазний генератор	59
3.2 Трифазні системи	60
3.3 З'єднання фаз генератора та фаз навантаження за схемою «зірка»	61
3.4 З'єднання фаз генератора та навантаження за схемою «трикутник»	63
3.5 Потужності трифазного кола синусоїдного струму	64



3.6 Переключення навантаження зі схеми «зірка» на схему «трикутник»	65
Контрольні запитання до теми 3	67
Список літератури для вивчення теми 3	67
<b>Лекція 6</b>	68
<b>Тема 4. Магнітні поля і магнітні кола</b>	68
4.1 Загальні поняття про магнітне поле і магнітні величини	68
4.2 Явище та закон електромагнетизму	70
4.3 Магнітне коло та його конструктивна схема	70
4.4 Магнітні властивості матеріалів	71
Контрольні запитання до теми 4	72
Список літератури для вивчення теми 4	73
<b>Лекція 7</b>	74
<b>Тема 5. Електровимірювальні прилади та електричні вимірювання</b>	74
5.1 Основні поняття з теорії електричних вимірювань	75
5.2 Класифікація електровимірювальних приладів	75
5.3 Будова та принцип дії електровимірювальних приладів різних систем	76
<b>Лекція 8</b>	83
<b>Тема 5. Електровимірювальні прилади та електричні вимірювання</b>	83
5.4 Похибки процесу вимірювання та електровимірювальних приладів	83
5.5 Вимірювання струму, напруги, потужності та коефіцієнту потужності	86
5.6 Вимірювання електричного опору	90
5.7 Вимірювання електричної енергії	93
Контрольні запитання до теми 5	96
Список літератури для вивчення теми 5	97
<b>Лекція 9</b>	98
<b>Тема 6. Трансформатори. Основи електропостачання</b>	98
6.1 Однофазний трансформатор	98
6.2 Трифазний силовий трансформатор	102
6.3 Вимірювальні трансформатори напруги та струму	104
<b>Лекція 10</b>	107
<b>Тема 6. Трансформатори. Основи електропостачання</b>	107
6.4 Автотрансформатор	108
6.5 Зварювальний трансформатор	108
6.6 Основи електропостачання	110
Контрольні запитання до теми 6	113
Список літератури для вивчення теми 6	114
<b>Лекція 11</b>	116
<b>Тема 7. Електричні машини постійного струму.</b>	116
<b>Електричні машини змінного струму</b>	116
7.1 Будова та принцип дії машин постійного струму	116
7.2 Генератори постійного струму	117

7.3 Двигуни постійного струму	120
<b>Лекція 12</b>	
<b>Тема 7. Електричні машини постійного струму.</b>	123
<b>Електричні машини змінного струму</b>	
7.4 Трифазні асинхронні електродвигуни	123
7.5 Трифазні синхронні машини	130
7.7 Однофазні двигуни змінного струму	134
Контрольні запитання до теми 7	135
Список літератури для вивчення теми 7	136
<b>Лекція 13</b>	137
<b>Тема 8. Електричні апарати</b>	
8.1 Загальні поняття про електричні апарати	137
8.2 Узагальнена структура електричного апарата	138
8.3 Комутаційні апарати	141
8.4 Реле	144
8.5 Запобіжники	145
Контрольні запитання до теми 8	146
Список літератури для вивчення теми 8	146
<b>Лекція 14</b>	147
<b>Тема 9. Основи електроніки та мікропроцесорної техніки</b>	
9.1 Предмет електроніки	147
9.2 Напівпровідникові резистори та діоди	152
9.3 Транзистори: біполярні, польові	156
9.4 Тиристори	159
9.5 Інтегральні мікросхеми та силові напівпровідникові модулі	161
9.6 Фотоелектричні прилади та тлумачення про оптоелектроніку	163
<b>Лекція 15</b>	166
<b>Тема 9. Основи електроніки та мікропроцесорної техніки</b>	
9.7 Випрямлячі та пристрої перетворювальної техніки	166
9.8 Електронні підсилювачі та генератори	170
9.9 Дискретні електронні пристрої	172
9.10 Мікропроцесорна техніка: мікроконтролери, пристрої пам'яті, функціонування інтерфейсу	179
Контрольні запитання до теми 9	185
Список літератури для вивчення теми 9	187

## ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка» - це поєднання трьох складових, а саме, *електротехніка* вивчає практичне використання електромагнітних явищ, *електроніка* вивчає використання електронних й іонних процесів, а *мікропроцесорна техніка* є вершиною розвитку електроніки, так як базується на вивченні та використанні великих спеціалізованих програмованих інтегральних мікросхем – мікропроцесорів.

Метою вивчення дисципліни є засвоєння основних понять та законів, які пов'язані з практичним використанням електричних та магнітних явищ, є вивчення будови та принципу дії електричних машин, апаратів керування та захисту, електровимірювальних та електронних приладів, що дозволить оволодіти методами аналізу електричних кіл однофазного та трифазного синусоїдного струму, принципами вибору апаратів керування та захисту, методами вимірювання електричних та магнітних величин та основами розрахунку електронних приладів, а також аналізувати роботу електричних машин та апаратів.

Знання умовних графічних та літерних позначень елементів в електричних колах дозволить студентам читати схеми розрахункові та електричні принципів однофазних та трифазних кіл.

Матеріал конспекту лекцій орієнтований для студентів неелектротехнічних спеціальностей при вивченні ними дисциплін загального електротехнічного профілю.

Під час підготовки матеріалів конспекту лекцій максимально враховані та використані, як традиції й багаторічний досвід викладання дисциплін «Електротехніка» та «Електроніка та мікросхемотехніка» на кафедрі «Електротехніка і електромеханіка імені професора В.В.Овчарова» в ТДАТУ, так і тенденції досягнень й розвитку сучасної електротехніки та електроніки, як наук, в Україні.

## Лекція 1

### ТЕМА 1. ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

#### План лекції

- 1.1 Явище електризації тіл і закон збереження заряду
- 1.2 Явище взаємодії заряджених тіл і закон Кулона
- 1.3 Явище електричного струму і закон Ома
- 1.4 Електричне коло і його елементи

#### **1.1 Явище електризації тіл і закон збереження заряду**

Речовини, з яких утворений навколишній світ, складаються з простих елементів – атомів. Кожний атом має ядро, навколо якого на орбітах обертаються електрони. Ядро знаходиться в центрі атома і має позитивний заряд та містить протони з позитивним зарядом і нейтрони, які не мають заряду.

Електрони заряджені негативно і рухаються на великій відстані від ядра. Електрони і протони є носіями елементарних (мінімальних) електричних зарядів.

У звичайному стані всі тіла електрично нейтральні, тобто кількість електронів у будь-якому тілі дорівнює кількості протонів у ньому, тому сума всіх негативних зарядів у тілі дорівнює сумі всіх позитивних зарядів. При щільному зіткненні двох тіл електрони, що входять до складу атомів одного тіла, можуть переходити до атомів іншого тіла внаслідок того, що енергія зв'язку їх з ядром в атомах різних хімічних елементів може бути неоднаковою. У результаті одне тіло втрачає деяку кількість електронів і заряджається позитивно, а інше тіло одержує ці електрони і заряджається негативно.

**Електризація тіла** – це втрата або придбання тілом деякої кількості електронів. Електричні заряди не створюються і не зникають, вони тільки можуть переходити від одного тіла до іншого.

**Закон збереження електричного заряду** полягає в тому, що алгебраїчна сума зарядів електрично замкнутої системи не змінюється з часом.

**Математичний запис закону збереження електричного заряду**

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = const, \quad (1.1)$$

де  $q_1, q_2, q_n$  – заряди, Кл.

**Приклад 1.1** В електричній замкнутій системі є два нейтрально заряджені тіла – скляний стакан та шовкова хустинка. Після натерття стакана хустинкою він здобув позитивний заряд величиною  $0,2$  Кл.

Який заряд отримала шовкова хустинка?

*Розв'язання:* До взаємодії закон збереження електричного заряду має вигляд  $q_1 + q_2 = const; 0 + 0 = 0$ . Після взаємодії двох тіл скляний стакан отримав позитивний заряд, тому закон збереження електричного заряду буде мати вигляд  $q_1 + q_2 = const; 0,2 + 0 = 0$ , а шовкова хустинка отримала негативний заряд, який дорівнює  $q_2 = -0,2$  Кл.

## 1.2 Явище взаємодії заряджених тіл і закон Кулона

**Явище взаємодії заряджених тіл** відкрив французький фізик *Ш. Дюфе* у 1730 р. Суть явища: між зарядженими тілами існують сили притягання або відштовхування, а саме, тіла, що мають заряд одного знаку, відштовхуються, а тіла, що мають заряд різного знаку, притягуються – рисунок 1.1.

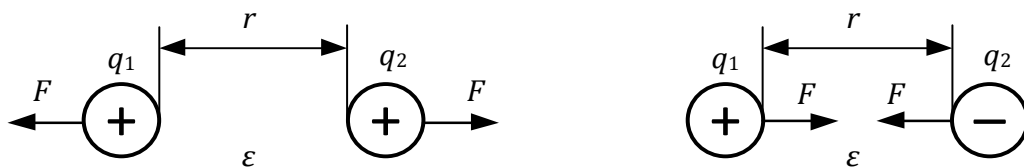


Рисунок 1.1 – Графічне пояснення до явища взаємодії заряджених тіл

**Закон взаємодії заряджених тіл (закон Кулона)** експериментально відкрив французький фізик *Шарль Кулон* у 1785 р. Формулювання закону: два нерухомих точкових електричних заряди взаємодіють із силою прямо пропорційною добутку цих зарядів і зворотно пропорційною квадрату відстані між ними і діелектричній проникності середовища.

**Математичний запис закону Кулона**

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}, \quad (1.2)$$

де  $F$  – сила взаємодії між точковими зарядами,  $H$ ;

$q_1, q_2$  – точкові заряди,  $Кл$ ;

$r$  – відстань між точковими зарядами,  $м$ ;

$\varepsilon_0$  – електрична постійна,  $\Phi/м$ ;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/м$ .

$\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність середовища, у якому знаходяться заряди.

Заряджені тіла взаємодіють за допомогою **електричного поля**, яке існує навколо них і є особливою формою матерії. Для виявлення електричного поля в заданій точці треба взяти заряджене тіло малої величини, якщо на нього діє сила  $F$ , то в цій точці є електричне поле. Заряд об'єкту, який використовується для даної перевірки, має назву **пробний заряд**, який повинен бути достатньо малим, щоб не впливати на інші заряди. Таким чином, **пробний заряд**,  $q_{пр}$  – це позитивний заряд малої величини.

Для силової характеристики електричного поля існує поняття напруженості електричного поля в даній точці. **Напруженість електричного поля** в даній точці – це фізична величина, яка чисельно дорівнює відношенню сили, з якою електричне поле діє на пробний заряд, розміщений у даній точці поля, до значення цього заряду згідно виразу

$$E = \frac{F}{q_{пр}}, \quad (1.3)$$

де  $E$  – напруженість,  $В/м$ ;

$F$  – сила,  $H$ ;

$q_{пр}$  – пробний заряд,  $Кл$ .

Для енергетичної характеристики електричного поля існує поняття **потенціалу** електричного поля в даній точці. **Потенціал електричного поля** в даній точці – це фізична величина, яка чисельно дорівнює відношенню потенційної енергії, яку має пробний заряд, поміщений у дану точку поля, до значення цього заряду, згідно виразу

$$\varphi = \frac{W}{q_{пр}}, \quad (1.4)$$

де  $\varphi$  – потенціал,  $B$ ;

$W$  – потенціальна енергія,  $Дж$ ;

$q_{пр}$  – пробний заряд,  $Кл$ .

Електричне поле заряду можна зобразити графічно за допомогою силових і еквіпотенціальних ліній.

**Силова лінія електричного поля** – це траєкторія руху вільного пробного заряду в цьому полі.

**Еквіпотенціальна лінія** – це лінія, що з'єднує точки електричного поля з однаковими потенціалами.

На рисунку 1.2 стрілками показані силові лінії, а пунктиром – еквіпотенціальні лінії електричного поля.

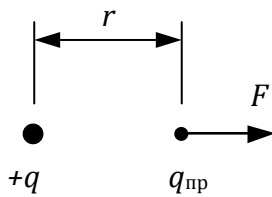


Рисунок 1.2 – Графічне зображення сигової та еквіпотенціальної ліній електричного поля

**Приклад 1.2** Заряд величиною  $q = +14 \cdot 10^{-12} Кл$  знаходиться в повітрі з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon = 1$ . На відстані  $0,02 м$  від нього знаходиться пробний заряд величиною  $q_{пр} = +1 \cdot 10^{-12} Кл$ .

Визначити силу, що діє на пробний заряд, напруженість електричного поля та потенціал в точці, де розташований пробний заряд.

Розв'язання:



Пробний заряд буде відштовхуватись із силою, величину якої знаходимо за виразом (1.2)

$$F = \frac{14 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot \pi \cdot 1,8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,02^2} = 3,15 \cdot 10^{-10} \text{ Н.}$$

Напруженість електричного поля визначається за виразом та дорівнює

$$E = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2} = \frac{14 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot \pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 0,02^2} = 315 \text{ В/м.}$$

Потенціал в точці визначається за виразом та дорівнює

$$\varphi = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r} = \frac{14 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot \pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 0,02} = 6,29 \text{ В.}$$

### 1.3 Явище електричного струму і закон Ома

Електрони різних типів атомів мають різні ступені свободи пересування. В деяких видах матеріалів, таких як метали, зовнішні електрони в атомах настільки слабо пов'язані, що вони хаотично рухаються в просторі між атомами. Оскільки ці практично незв'язані електрони можуть вільно залишати їх відповідні атоми і плавати в просторі між сусідніми атомами, їх часто називають **вільними електронами**. В інших типах матеріалів, таких як скло, електрони атомів мають дуже мало свободи для переміщення, ця відносна рухливість електронів в матеріалі відома як **електропровідність**.

Матеріали з високою рухливістю електронів, тобто в яких багато вільних електронів, мають назву **провідники**, а матеріали з низькою рухливістю електронів, тобто в яких мало або зовсім немає вільних електронів, мають назву **ізолятори**.

Якщо до кінців провідника підвести заряди різного знаку, то в провіднику виникне електричне поле, яке створюється цими зарядами. Вплив електричного поля на вільні заряди приведе їх у рух у визначеному напрямку. Цей упорядкований спрямований рух вільних зарядів під дією сил електричного поля має назву електричний струм провідності.



Історично прийнято, що напрям струму збігається з напрямком руху позитивних зарядів в провіднику. Графічно електричний струм зображується стрілкою  $\longrightarrow$ .

**Сила електричного струму** – це фізична величина, що дорівнює відношенню кількості заряду, що пройшов за деякий час через поперечний переріз провідника  $\Delta q$ , до величини цього проміжку часу  $\Delta t$ , за виразом

$$I = \frac{q}{t}, \quad (1.5)$$

де  $I$  – сила електричного струму,  $A$ ;

$q$  – заряд,  $Kл$ ;

$t$  – час,  $с$ .

При русі вільних зарядів по провіднику вони зіштовхуються з молекулами (атомами) і одержують опір своєму руху. Для характеристики цього факту існує поняття **опір провідника електричному струму**, який залежить від матеріалу провідника, довжини провідника і площі поперечного перерізу провідника, згідно виразу

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (1.6)$$

де  $R$  – опір провідника,  $Ом$ ;

$\rho$  – питомий опір провідника,  $Ом \cdot мм^2 / м$ ;

$l$  – довжина провідника,  $м$ ;

$S$  – площа поперечного перерізу провідника,  $мм^2$ .

**Приклад 1.3** Алюмінієвий провідник з питомим опором  $\rho = 0,023 \text{ Ом} \cdot мм^2 / м$  має довжину  $l = 1000 \text{ м}$  та площу поперечного перерізу  $S = 2,3 \text{ мм}^2$ . Визначити опір провідника.

*Розв'язання:*

За виразом (1.6) опір провідника дорівнює

$$R = 0,023 \cdot \frac{1000}{2,3} = 10 \text{ Ом}.$$

**Закон електричного струму.** Німецький фізик *Георг Ом* у 1826 р. відкрив закон електричного струму, згідно якого **сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі (різниці потенціалів) на затискачах провідника і зворотно пропорційна опору провідника.** Закон отримав назву **закон Ома.**

**Математичний запис закону Ома**

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.7)$$

де  $I$  – сила струму в провіднику,  $A$ ;

$U$  – напруга на затискачах провідника,  $B$ ;

$R$  – опір провідника,  $Om$ .

#### 1.4 Електричне коло і його елементи

Для того, щоб електричний струм мав змогу протікати по провіднику, необхідно замкнуте електричне коло. **Електричне коло** – це сукупність пристроїв, які забезпечують можливість створення електричного струму.

До **основних елементів** електричного кола належать джерело електричної енергії, приймач (навантаження) і проводи, які їх з'єднують.

**Джерело електричної енергії** – це пристрій, у якому енергія механічна, тепла, хімічна перетворюється в електричну енергію. У залежності від виду перетворюваної енергії розрізняють наступні типи джерел: механічні генератори, акумулятори, гальванічні елементи, термо- та фотоелементи.

До **допоміжних елементів** електричного кола належать вимикачі, рубильники, реле, запобіжники, електровимірювальні прилади.

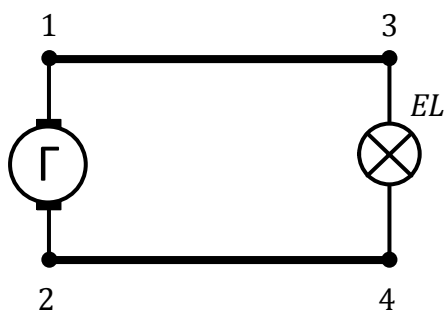


Рисунок 1.3 – Приклад принципової електричної схеми кола

**Принципова електрична схема кола** – це графічне зображення за допомогою умовних графічних і літерно-цифрових позначень окремих елементів кола та зв'язків між ними.

Приклад принципової електричної схеми кола, що містить джерело електричної

енергії (машинний генератор  $\Gamma$ ), лінію електропередачі та приймач (освітлювальне навантаження  $EL$ ), наведено на рисунку 1.3.

Умовні графічні позначення найбільш поширених елементів електричних кіл наведені на рисунку 1.4.

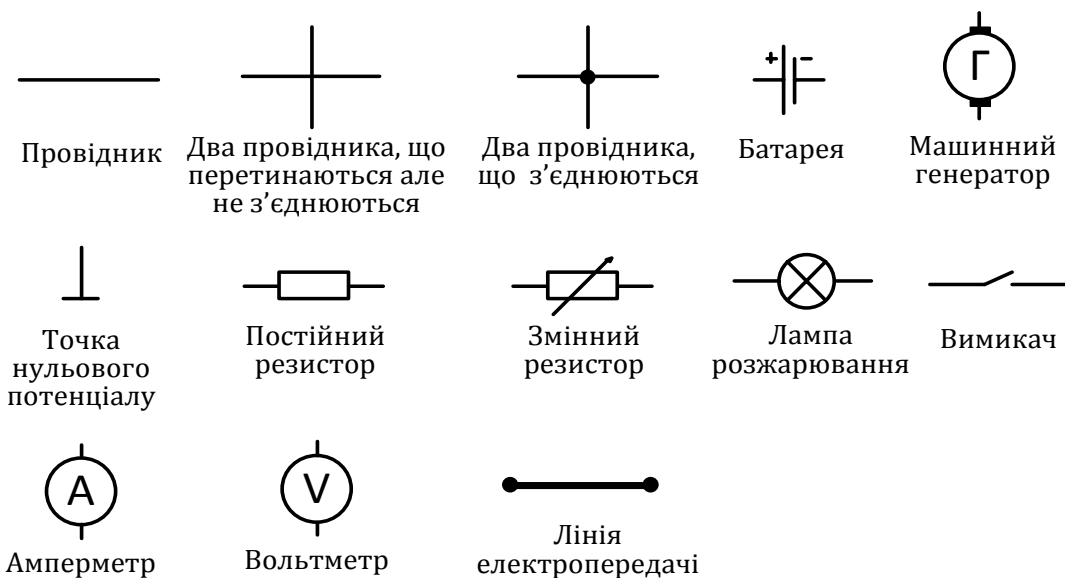


Рисунок 1.4 - Умовні графічні позначення елементів електричних кіл

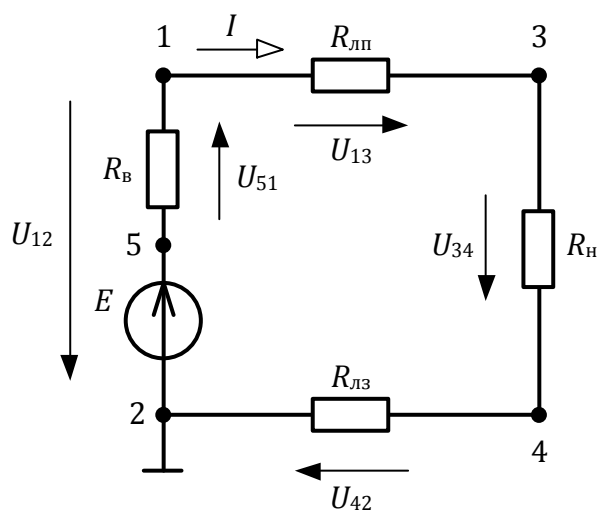




Рисунок 1.5 – Розрахункова схема електричного кола

**Розрахункова схема електричного кола** – це графічне та літерне позначення фізичних явищ, які спостерігаються в окремих елементах електричного кола. На рисунку 1.5 зображена розрахункова схема електричного кола, принципова схема якого наведена на рисунку 1.4.

Генератор розвиває е.р.с., яку графічно на розрахункових схемах по-

значають . У обмотці генератора виділяється тепло, це враховується за допомогою внутрішнього опору, який графічно позначається . У проводах, що пов'язують джерело і приймач, також виділяється тепло, це враховується"

ся за допомогою опорів прямого і зворотного проводів, які графічно позначаються  $\text{---}\square\text{---}R_{\text{лп}}$  і  $\text{---}\square\text{---}R_{\text{лз}}$  відповідно. Перетворення енергії в приймачі (освітлювальне навантаження) враховується за допомогою опору, який графічно позначається  $\text{---}\square\text{---}R_{\text{н}}$ .

## Лекція 2

### ТЕМА 1. ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

#### План лекції

- 1.5 Явище теплової дії електричного струму і закон Джоуля-Ленца
- 1.6 Розрахунок нерозгалуженого електричного кола
- 1.7 Закони Кірхгофа та їх застосування для розрахунку розгалужених кіл
- 1.8 Еквівалентні перетворення схем з'єднань опорів

#### 1.5 Явище теплової дії електричного струму і закон Джоуля-Ленца

Проходження електричного струму по провіднику супроводжується його нагріванням, пояснюється таке явище теплової дії струму тим, що вільні електрони в металах під дією електричного поля переміщуються та зіштовхуються з атомами речовини провідника й передають їм частину своєї кінетичної енергії. У результаті роботи електричного струму збільшується швидкість коливань атомів і, відповідно, температура провідника зростає.

**Закон теплової дії струму** був встановлений англійським фізиком *Джеймсом Джоулем* у 1841 р. та незалежно від нього російським фізиком *Емілієм Ленцом* у 1842 р. Відповідно до цього закону **кількість тепла, яка виділяється в провіднику, прямо пропорційна опору провідника, квадрату сили електричного струму і часу його дії.**

#### Математичний запис закону теплової дії струму

$$W = R \cdot I^2 \cdot t, \quad (1.8)$$

де  $W$  – енергія, яка виділилася в провіднику, Дж;

$R$  – опір провідника, Ом;

$I$  – сила струму в провіднику, А;

$t$  – час протікання електричного струму в провіднику, с.

**Приклад 1.4** По провіднику, опір якого дорівнює 100 Ом, проходить електричний струм силою 10 А за 100 секунд.

Визначити кількість тепла, яка виділиться в провіднику за цей час.

*Розв'язання:*

За виразом (1.8) кількість тепла, яка виділиться в провіднику за час, дорівнює

$$W = 100 \cdot 10^2 \cdot 100 = 1000000 \text{ Дж} = 1 \text{ МДж}.$$

Для зручності енергетичної характеристики джерел і приймачів електричної енергії існує поняття **потужність електричного струму**. Потужність – це кількість електричної енергії, яка виділяється в провіднику за одиницю часу, згідно виразу

$$P = \frac{W}{t}, \quad (1.9)$$

де  $P$  – потужність,  $\text{Вт}$ ;

$W$  – енергія,  $\text{Дж}$ ;

$t$  – час,  $\text{с}$ .

З урахуванням виразів (1.8) та (1.9) вираз для розрахунку потужності набуває вигляд

$$P = R \cdot I^2. \quad (1.10)$$

**Приклад 1.5** У провіднику, по якому проходить електричний струм, за 100 секунд виділяється 220 000 Дж теплової енергії.

Визначити потужність електричного струму.

*Розв'язання:*

За виразом (1.9) потужність електричного струму дорівнює

$$P = \frac{220000}{100} = 2200 \text{ Вт} = 2,2 \text{ кВт}.$$

## 1.6 Розрахунок нерозгалуженого електричного кола

Розглянемо розрахункову схему електричного кола, яка наведена на рисунку 1.5. Кожна точка (1, 2, 3, 4, 5) розрахункової схеми має визначений **потенціал** – це відношення потенціальної енергії зарядів, що рухаються у даній точці кола, до величини цих зарядів.

Різниця потенціалів на ділянці кола – це **напруга** на цій ділянці електричного кола, тобто це **спадання напруги**, наприклад, для ділянки кола 1-2

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (1.11)$$

де  $\varphi_1, \varphi_2$  – потенціали точок 1 і 2,  $B$ ;

$U_{12}$  – напруга між точками 1 і 2,  $B$ .

Розглянемо **закон Ома для замкненого кола з однією е.р.с.**: сила струму в колі прямо пропорційна значенню е.р.с. і зворотно пропорційна сумарному опору кола, згідно виразу

$$I = \frac{E}{\sum R_i}, \quad (1.12)$$

де  $E$  – е.р.с., що діє в колі,  $B$ ;

$\sum R$  – сумарний опір кола,  $Om$ .

При аналізі та розрахунку нерозгалужених електричних кіл, як правило, цікавлять не потенціали точок схеми, а напруги на визначених ділянках. Тому можна прийняти, що потенціал однієї з точок схеми умовно дорівнює нулю, а потім розраховувати відносні значення потенціалів інших точок. Наприклад, можна прийняти, що потенціал точки 2 (див. рисунок 1.5) дорівнює нулю, тобто  $\varphi_2 = 0$ . При визначенні та запису потенціалів інших точок електричного кола необхідно враховувати наступне:

- якщо е.р.с. спрямована у бік точки, то потенціал цієї точки збільшується на величину цієї е.р.с. відносно точки, від якої спрямована е.р.с., у даному прикладі  $\varphi_5 = \varphi_2 + E$ ;

- при переході через опір потенціал наступної точки зменшується на величину спадання напруги, тому що заряди в результаті зіткнення з атомами (молекулами) на цій ділянці віддають їм частину своєї потенціальної енергії, яка виділяється у вигляді тепла, наприклад,  $\varphi_1 = \varphi_5 - R_B \cdot I$ ;

- електричний струм спрямований від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом.

**Приклад 1.6** Для розрахункової схеми, приведеної на рисунку 1.5, відомо, що  $E = 250 \text{ В}$ ,  $\varphi_2 = 0$ ,  $t = 1000 \text{ год.}$ , *вартість*  $1 \text{ кВт}\cdot\text{год} = 1,2 \text{ грн.}$ ;  $R_B = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_{ЛП} = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_H = 17 \text{ Ом}$ ,  $R_{ЛЗ} = 3 \text{ Ом}$ .

Визначити:  $I$ ;  $\varphi_5$ ;  $\varphi_1$ ;  $\varphi_3$ ;  $\varphi_4$ ;  $U_{51}$ ;  $U_{13}$ ;  $U_{34}$ ;  $U_{42}$ ;  $U_{12}$ ;  $P$ ;  $P_{12}$ ;  $P_6$ ;  $P_{ЛП}$ ;  $P_H$ ;  $P_{ЛЗ}$ ;  $\eta_L$ ;  $\eta_S$ ;  $\eta_Y$ ;  $W_H$ ; *вартість електроенергії*.

*Розв'язання:*

- сила електричного струму в електричному колі визначається та дорівнює

$$I = \frac{E}{R_B + R_{ЛП} + R_H + R_{ЛЗ}} = \frac{250}{2 + 3 + 17 + 3} = 10 \text{ А};$$

- потенціал точки 5,  $\varphi_5$ , визначається та дорівнює

$$\varphi_5 = \varphi_2 + E = 0 + 250 = 250 \text{ В};$$

- потенціал точки 1,  $\varphi_1$ , визначається та дорівнює

$$\varphi_1 = \varphi_5 - R_B \cdot I = 250 - 2 \cdot 10 = 230 \text{ В};$$

- потенціал точки 3,  $\varphi_3$ , визначається та дорівнює

$$\varphi_3 = \varphi_1 - R_{ЛП} \cdot I = 230 - 3 \cdot 10 = 200 \text{ В};$$

- потенціал точки 4,  $\varphi_4$ , визначається та дорівнює

$$\varphi_4 = \varphi_3 - R_H \cdot I = 200 - 17 \cdot 10 = 30 \text{ В};$$

- потенціал точки 2,  $\varphi_2$ , визначається та дорівнює

$$\varphi_2 = \varphi_4 - R_{ЛЗ} \cdot I = 30 - 3 \cdot 10 = 0 \text{ В};$$

- напруга на ділянці 5-1 визначається та дорівнює

$$U_{51} = \varphi_5 - \varphi_1 = R_B \cdot I = 250 - 230 = 2 \cdot 10 = 20 \text{ В};$$

- напруга на ділянці 1-3 визначається та дорівнює

$$U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 = R_{ЛП} \cdot I = 230 - 200 = 3 \cdot 10 = 30 \text{ В};$$

- напруга на ділянці 3-4 визначається та дорівнює

$$U_{34} = \varphi_3 - \varphi_4 = R_H \cdot I = 200 - 30 = 17 \cdot 10 = 170 \text{ В};$$

- напруга на ділянці 4-2 визначається та дорівнює

$$U_{42} = \varphi_4 - \varphi_2 = R_{ЛЗ} \cdot I = 30 - 0 = 3 \cdot 10 = 30 \text{ В};$$

- напруга на ділянці 1-2 визначається та дорівнює



$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = E - R_B \cdot I = 250 - 2 \cdot 10 = 230B;$$

- потужність, яку розвиває джерело, визначається та дорівнює

$$P = E \cdot I = 250 \cdot 10 = 2500Bm;$$

- потужність, яка втрачається в джерелі, визначається та дорівнює

$$P_B = R_B \cdot I^2 = U_{51} \cdot I = 2 \cdot 10^2 = 20 \cdot 10 = 200Bm;$$

- потужність, яка віддається джерелом, визначається та дорівнює

$$P_{12} = U_{12} \cdot I = P - P_B = 230 \cdot 10 = 2500 - 200 = 2300Bm;$$

- потужність, яка втрачається в прямому проводі лінії електропередачі, визначається та дорівнює

$$P_{III} = U_{13} \cdot I = R_{III} \cdot I^2 = 30 \cdot 10 = 3 \cdot 10^2 = 300Bm;$$

- потужність, яка споживається навантаженням, визначається та дорівнює

$$P_H = U_H \cdot I = R_H \cdot I^2 = 170 \cdot 10 = 17 \cdot 10^2 = 1700Bm;$$

- потужність, яка втрачається в зворотному проводі лінії електропередачі, визначається та дорівнює

$$P_{ЛЗ} = U_{42} \cdot I = R_{ЛЗ} \cdot I^2 = 30 \cdot 10 = 3 \cdot 10^2 = 300Bm;$$

- баланс потужностей

$$P = P_B + P_{III} + P_H + P_{ЛЗ};$$

$$2500Bm = 200 + 300 + 1700 + 300 = 2500Bm;$$

- коефіцієнт корисної дії лінії електропередачі визначається та дорівнює

$$\eta_{Л} = \frac{P_H}{P_{12}} = \frac{1700}{2500} = 0,74;$$

- коефіцієнт корисної дії генератора визначається та дорівнює

$$\eta_{Г} = \frac{P_{12}}{P} = \frac{2300}{2500} = 0,92;$$

- коефіцієнт корисної дії електроустановки визначається та дорівнює

$$\eta_{у} = \frac{P_H}{P} = \frac{1700}{2500} = 0,68;$$

- енергія, яку споживає навантаження за 100 год., визначається та дорівнює

$$W_H = P_H \cdot t = 1,7 \cdot 1000 = 1700kBm \cdot z \text{ od} -$$

- вартість електричної енергії, яку споживає навантаження за 1000 год.

$$\text{вартість} = W_H \cdot 1,2 = 1700 \cdot 1,2 = 2040 \text{ грн}$$

### 1.7 Закони Кірхгофа та їх застосування для розрахунку розгалужених кіл

Електричне коло, що наведене на рисунку 1.5, є **нерозгалуженим колом**, так як в усіх елементах цього кола протікає один і той самий електричний струм. На рисунку 1.6 наведене **розгалужене електричне коло**, так як воно характеризується наявністю вузлів 3 та 4.

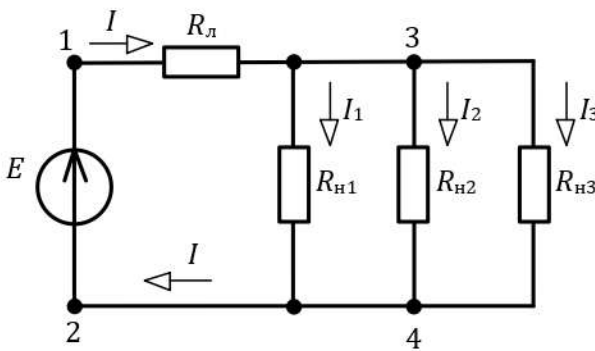


Рисунок 1.7 – Розрахункова схема розгалуженого електричного кола

Конфігурацію розрахункової схеми розгалуженого електричного кола можна визначити наступними поняттями: **розгалуження**, **вузол**, **контур**. Кожне **розгалуження** містить один чи декілька послідовно з'єднаних елементів, кожний з яких має два виводи: початок і кінець.

Слід відзначити, що кінець кожного попереднього елемента з'єднаний з початком наступного. **Вузол** – це місце з'єднання трьох або більшої кількості віток. **Контур** – це замкнений шлях, що проходить по декількох вітках так, що жодна вітка та жоден вузол не зустрічається більше одного разу.

Розгалужені електричні кола розраховуються різними методами, в основу яких покладені закони, які відкрив німецький фізик *Гюстав Кірхгоф* у 1845 році. **Перший (1-й) закон Кірхгофа** формулюється так: **алгебраїчна сума сил струмів у вузлі дорівнює нулю**

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (1.13)$$

Умовно приймають, що сили струмів, які входять у вузол, мають знак «+», а сили струмів, які виходять з вузла, мають знак «-».

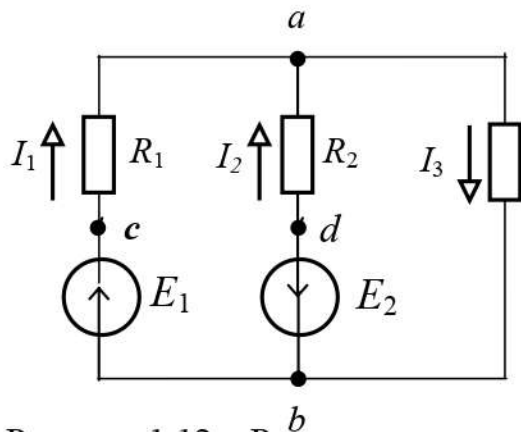


Рисунок 1.12 – Розрахункова схема розгалуженого електричного кола

Наприклад, для розрахункової схеми електричного кола, яка наведена на рисунку 1.7, за 1-м законом Кірхгофа рівняння для вузла «а» має вигляд

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

**Другий (2-й закон) Кірхгофа** формулюється так: у замкненому контурі електричного кола алгебраїчна сума е.р.с. дорівнює алгебраїчній сумі спадання напруги на опорах, що складають цей контур

$$\sum_1^n E_i = \sum_1^n R_i \cdot I_i. \quad (1.14)$$

Умовно приймають, що е.р.с. та сили струмів мають знак «+», якщо їх напрями збігаються з довільно обраним напрямом обходу контуру, а якщо не збігаються – знак «-». Наприклад, для контуру a-d-b-c-a (рисунок 1.7) при напрямі обходу за годинниковою стрілкою, отримуємо, що

$$E_1 + E_2 = R_1 \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2. \quad (1.15)$$

Для вирішення задач аналізу розгалужених електричних кіл за допомогою **законів Кірхгофа** необхідно скласти рівняння електричної рівноваги заданої розрахункової схеми електричного кола в наступній послідовності:

- обрати довільні напрями струмів у всіх розгалуженнях схеми електричного кола;
- скласти рівняння за 1-м законом Кірхгофа для вузлів схеми кола, при цьому кількість вузлів повинна бути на один вузол менше, ніж сумарна кількість вузлів схеми кола;
- обрати напрями обходів усіх незалежних контурів схеми кола;

- скласти рівняння за 2-м законом Кірхгофа для всіх незалежних контурів схеми кола;
- розв'язати отриману систему рівнянь.

Розглянемо застосування законів Кірхгофа на прикладі розрахункової схеми електричного кола, яка наведена на рисунку 1.8. Схема має **шість розгалужень** ( $m=6$ ) і **чотири вузли** ( $n=4$ ).

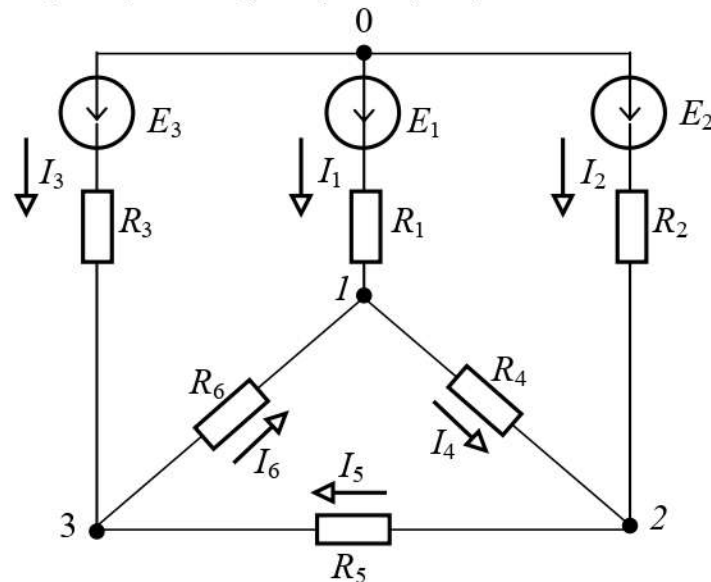


Рисунок 1.8 – Розрахункова схема електричного кола для пояснення застосування законів Кірхгофа

Складаємо рівняння за 1-м законом Кірхгофа (кількість рівнянь становить 3, так як  $(n - 1 = 4 - 1 = 3)$ ), тому то отримано, що

$$\text{для вузла 1: } I_1 + I_6 - I_4 = 0;$$

$$\text{для вузла 2: } I_2 + I_4 - I_5 = 0;$$

$$\text{для вузла 3: } I_3 + I_5 - I_6 = 0.$$

При складанні рівнянь за 2-м законом Кірхгофа необхідно враховувати, що рівняння повинні бути взаємно незалежними. Для цього контури необхідно обирати так, щоб кожний контур, для якого складається рівняння, неможливо було отримати з контурів, для яких уже складені рівняння, шляхом видалення з них загальних розгалужень. Наприклад, контур 0–2–1–3–0 можна отримати з контурів 0–1–2–0 та 0–1–3–0 шляхом видалення з них загального розгалуження 0–1.

Усього рівнянь за 2-м законом Кірхгофа повинне бути  $m - n + 1 = 3$ .

Обираємо незалежні контури 0–1–3–0; 0–1–2–0 та 1–2–3–1. Складаємо для них рівняння за 2-м законом Кірхгофа, напрями обходів контурів обираємо за годинниковою стрілкою, тому то

$$\text{для контуру } 0-1-3-0: R_1 \cdot I_1 - R_6 \cdot I_6 - R_3 \cdot I_3 = E_1 - E_3;$$

$$\text{для контуру } 0-1-2-0: R_2 \cdot I_2 - R_4 \cdot I_4 - R_1 \cdot I_1 = E_2 - E_1;$$

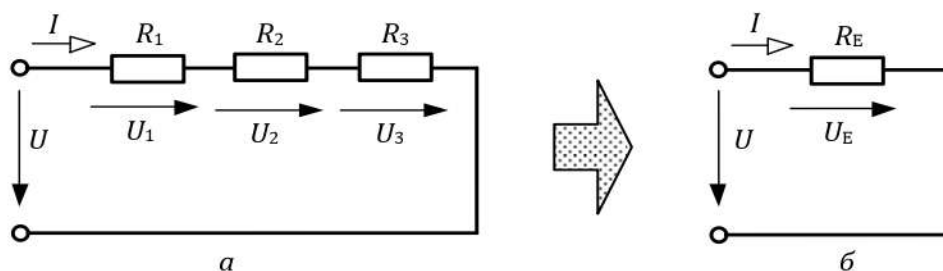
$$\text{для контуру } 1-2-3-1: R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 + R_6 \cdot I_6 = 0.$$

Таким чином, одержано 6 рівнянь із 6 невідомими:  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  і  $I_6$ . Спільне вирішення цих рівнянь дозволяє одержати значення сил струмів у всіх розгалуженнях схеми кола. Якщо при вирішенні рівнянь сила струму буде мати негативне значення, то це означає, що напрям струму на схемі кола необхідно замінити на протилежний.

### 1.8 Еквівалентні перетворення схем з'єднань опорів

Для спрощення аналізу складних електричних кіл окремі їх ділянки, що не містять е.р.с., можна замінити одним еквівалентним опором. **Еквівалентний опір** – це опір, який буде включений до кола замість замінної групи опорів та не буде змінювати розподіл струмів і напруг в іншій частині електричного кола.

На рисунку 1.9.а наведена схема послідовного з'єднання опорів (початковий варіант), а на рисунку 1.9.б – схема кола з еквівалентним опором.



а – початковий варіант схеми; б – схема кола з еквівалентним опором

Рисунок 1.9 – Схема послідовного з'єднання опорів

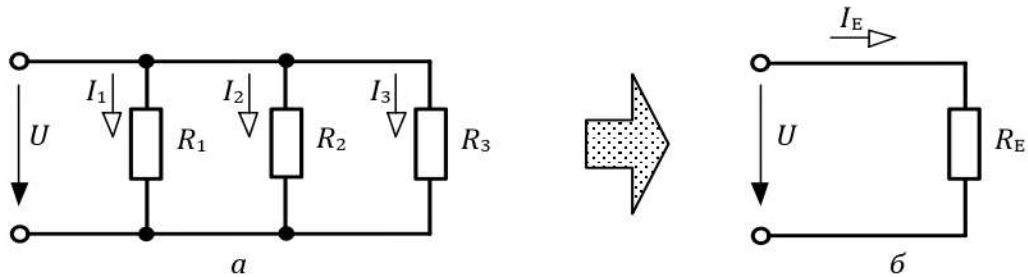
При послідовному з'єднанні опорів по кожному з них протікає один й той самий струм, а падіння напруги на еквівалентному опорі має дорівнювати сумі падінь напруг на вихідних опорах, згідно виразу

$$R_{\Sigma} \cdot I = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I_3, \quad (1.16)$$

отже, еквівалентний опір дорівнює

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3. \quad (1.17)$$

На рисунку 1.10.а наведена схема паралельного з'єднання опорів (початковий варіант), а на рисунку 1.10.б – схема кола з еквівалентним опором.



а – початковий варіант схеми; б – схема кола з еквівалентним опором

Рисунок 1.10 – Схема паралельного з'єднання опорів

Якщо група опорів, що замінюються еквівалентним опором, з'єднана паралельно, то напруги на кожному з них і на еквівалентному опорі однакові. Умови еквівалентності будуть виконані, якщо струм через результуючий опір буде дорівнює сумі струмів через окремі паралельні опори

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3. \quad (1.18)$$

Згідно закону Ома для окремого опору, можливо записати, що

$$\frac{U}{R_{\Sigma}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}, \quad (1.19)$$

остаточно

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (1.20)$$

**Провідність елемента електричного кола** – це фізична величина, яка характеризує здатність елемента кола проводити електричний струм, та яка обернено пропорційна опору елемента кола згідно виразу

$$g = \frac{1}{R}. \quad (1.21)$$

Одиницею вимірювання провідності є *См* (сіменс).

Отже, можна зробити висновок, що еквівалентна провідність для з'єднаних паралельно віток кола дорівнює сумі їх провідностей за формулою

$$g_{\Sigma} = g_1 + g_2 + g_i. \quad (1.22)$$

### Приклад 1.7

Одна освітлювальна та дві нагрівальні установки живляться від генератора постійного струму за допомогою лінії електропередачі. Опір освітлювальної установки дорівнює 8 Ом. Опори нагрівальних установок відповідно дорівнюють 43 Ом і 4 Ом. Опір лінії електропередачі на ділянці «генератор – освітлювальна установка» дорівнює 5 Ом. Опір лінії електропередачі на ділянці «освітлювальна установка – нагрівальні установки» дорівнює 6 Ом. Електро рушійна сила, яку розвиває генератор, дорівнює 300 В. Внутрішній опір генератора дорівнює 1 Ом.

Скласти розрахункову схему кола. Визначити силу струму, який віддається генератором, силу струму та напругу на затискачах освітлювальної установки, потужність, яку споживає освітлювальна установка.

*Розв'язання:*

1.Робробимо розрахункову схему електричного кола – рисунок 1.11, яка містить:

$R_B$  – внутрішній опір генератора;

$R_1$  – опір лінії електропередачі на ділянці «генератор - освітлювальна установка»;

$R_2$  – опір освітлювальної установки;

$R_3$  – опір лінії електропередачі на ділянці «освітлювальна - нагрівальні установки»;

$R_4$  і  $R_5$  – опори нагрівальних установок.

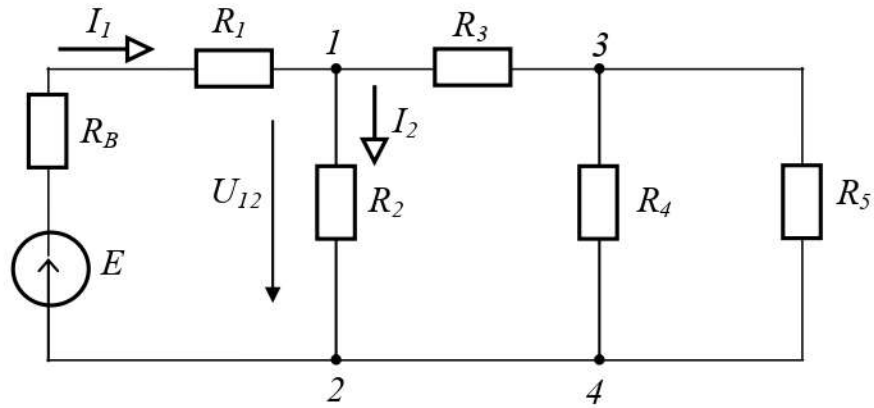


Рисунок 1.11 – Розрахункова схема до завдання 1.7

2. Здійснимо заміну двох паралельно з'єднаних опорів  $R_4$  та  $R_5$  на ділянці 3-4 одним еквівалентним опором  $R_{45}$  за виразом

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} = 2 \text{ Ом.}$$

3. Здійснимо заміну опорів  $R_3$  і  $R_{45}$ , які з'єднані послідовно, одним еквівалентним опором  $R_{345}$  за виразом

$$R_{345} = R_3 + R_{45} = 6 + 2 = 8 \text{ Ом.}$$

4. Здійснимо заміну паралельно з'єднаних опорів  $R_2$  і  $R_{345}$  одним еквівалентним опором  $R_{2345}$  за виразом

$$R_{2345} = \frac{R_2 \cdot R_{345}}{R_2 + R_{345}} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4 \text{ Ом.}$$

5. Визначаємо еквівалентний опір усього кола за виразом

$$R_{\Sigma} = R_B + R_1 + R_{2345} = 1 + 5 + 4 = 10 \text{ Ом.}$$

6. Визначаємо силу струму в колі за виразом

$$I_1 = \frac{E}{R_{\Sigma}} = \frac{300}{10} = 3 \text{ А.}$$

7. Визначаємо напругу між вузлами 1 і 2 за виразом

$$U = E - R_B \cdot I - R_1 \cdot I = 300 - 1 \cdot 30 - 5 \cdot 30 = 120 \text{ В.}$$

8. Визначаємо силу струму, що протікає між вузлами 1 і 2 за виразом



$$I_2 = \frac{U_{12}}{R_2} = \frac{120}{8} = 15 A.$$

9. Визначаємо потужність, яку споживає освітлювальна установка, за виразом

$$P_2 = R_2 \cdot I^2 = U_{12} \cdot I_2 = 8 \cdot 15^2 = 120 \cdot 15 = 1800 \text{ Вт}.$$

### Контрольні запитання до теми 1

1. Поясніть суть явища електризації тіл?
2. Сформулюйте закон збереження заряду та наведіть його математичний запис.
3. Поясніть суть явища взаємодії заряджених тіл?
4. Сформулюйте закон взаємодії заряджених тіл та наведіть математичний запис закону Кулона.
5. Що таке напруженість електричного поля, потенціал електричного поля та напруги?
6. Що таке силова лінія електричного поля та екіпотенціальна лінія електричного поля?
7. Поясніть суть явища електричного струму. Що таке сила електричного струму?
8. Що таке електрорушійна сила?
9. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола та наведіть його математичний запис.
10. Поясніть суть явища теплової дії струму, сформулюйте закон теплової дії струму та наведіть математичний запис закону Ленца – Джоуля.
11. Що таке потужність електричного кола?
12. Що таке електричне кола? Які елементи електричного кола є основними, а які є допоміжними?
13. Які електричні кола є нерозгалуженими та розгалуженими?
14. Що таке розгалуження розгалуженого електричного кола? Наведіть приклади розрахункової схеми розгалуженого кола.
15. Сформулюйте 1-й закон Кірхгофа та наведіть його математичний запис.

16. Сформулюйте 2-й закон Кірхгофа та наведіть його математичний запис.
17. Як розрахувати еквівалентний опір послідовно з'єднаних опорів?
18. Як розрахувати еквівалентний опір паралельно з'єднаних опорів?
19. Що таке провідність елемента кола? Яка одиниця вимірювання провідності?

### **Список літератури для вивчення теми 1**

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / В.І.Мілих, О.О.Шавьолкін. За ред. В.І.Мілих. – К.: Каравелла, 2007. – 688 с.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / Будіщев М.С. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
3. Овчаров В.В. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / В.В.Овчаров, О.Ю.Вовк. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.
4. Паначевний Б.І. Загальна електротехніка: теорія і практикум / Б.І. Паначевний, Ю.Ф. Свєргун. – Київ: Каравела, 2003. – 440 с.

### Лекція 3

## ТЕМА 2 НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

### План лекції

- 2.1 Основні фізичні поняття
- 2.2 Коло змінного синусоїдного струму з резистором
- 2.3 Коло змінного синусоїдного струму з ідеальною котушкою
- 2.4 Коло змінного синусоїдного струму з ідеальним конденсатором

#### 2.1 Основні фізичні поняття

**Явище електромагнетизму** було відкрито у 1820 р. датським фізиком *Гансом Крістіаном Ерстедом*. Суть явища: при протіканні по провіднику електричного струму навколо останнього утворюється магнітне поле.

Суть закону електромагнетизму: потокозчеплення електричної котушки прямо пропорційно силі електричного струму й індуктивності котушки.

Математичний запис закону електромагнетизму має вигляд

$$\psi = w \cdot \Phi = L \cdot i, \quad (2.1)$$

де  $\psi$  – потокозчеплення котушки,  $Вб$ ;

$w$  – кількість витків котушки;

$\Phi$  – магнітний потік,  $Вб$ ;

$L$  – індуктивність котушки,  $Гн$ ;

$i$  – сила електричного струму в котушці,  $A$ .

**Явище електромагнітної індукції** відкрив у 1831 році англійський фізик *Майкл Фарадей*. Суть явища: якщо провідний контур пронизується змінним магнітним потоком, то в контурі наводиться електрорушійна сила – рисунок 2.1.

**Закон електромагнітної індукції** формулюється так: значення електрорушійної сили, яка наводиться в контурі, прямо пропорційно кількості витків контуру і швидкості зміни магнітного потоку.

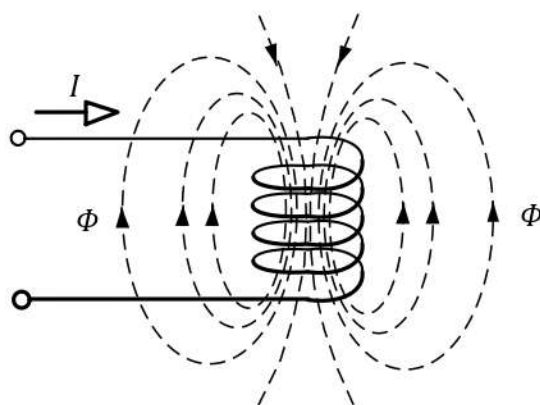


Рисунок 2.1 – Ілюстрація – пояснення суті явища електромагнітної індукції

### Математичний запис закону електромагнітної індукції

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.2)$$

де  $e$  – електрорушійна сила,  $B$ ;  
 $w$  – кількість витків котушки;  
 $\Phi$  – магнітний потік,  $Bб$ ;  
 $T$  – поточний час,  $c$ .

**Фізична суть знака «мінус»:** якщо в даний момент часу магнітний потік, що пронизує контур, збільшується, то він наводить е.р.с., яка створить електричний струм, а останній, свій магнітний потік, який буде спрямований проти основного потоку і навпаки.

Явища електромагнетизму й електромагнітної індукції лежать в основі принципу дії генераторів змінного синусоїдного струму.

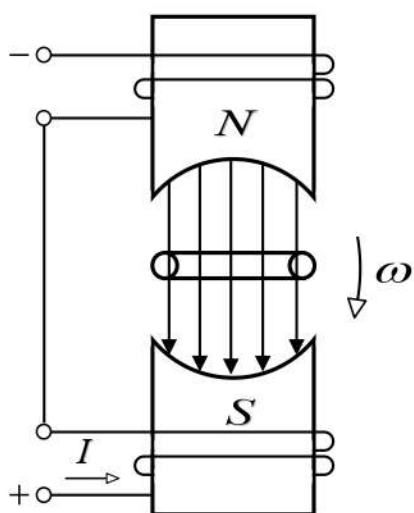


Рисунок 2.2

На рисунку 2.2. наведений спрощений варіант конструктивної схеми генератора змінного синусоїдного струму. Магнітний потік створюється струмом намагнічування  $I$ . Провідний контур (рамка) розміщений на осі між полюсами електромагніта.

Якщо рамку обертати, то магнітний потік, що пронизує рамку, буде змінюватися в часі за синусоїдним законом, і у рамці буде наводитися е.р.с., яка також буде змінюватися за синусоїдним законом в залежності від кута відхилення рамки від горизонтального положення, згідно виразу

$$e = E_m \sin \alpha, \quad (2.3)$$

де  $E_m$  – амплітудне (максимальне) значення е.р.с. (при вертикальному положенні рамки), В;

$\alpha$  – кут відхилення рамки від горизонтального положення, рад (град);

$e$  – миттєве значення е.р.с. для заданого кута відхилення рамки, В.

Кут відхилення рамки залежить у часі від кутової швидкості обертання рамки згідно виразу

$$\alpha = \omega \cdot t, \quad (2.4)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання рамки, рад/с;

$t$  – поточний час, с.

Таким чином, одержимо залежність е.р.с. від кутової швидкості обертання рамки згідно виразу

$$e = E_m \sin \omega \cdot t. \quad (2.5)$$

Якщо рамку замкнути за допомогою щіткового механізму на резистор, то виникає синусоїдний струм, який дорівнює

$$i = I_m \sin \omega \cdot t, \quad (2.6)$$

де  $I_m$  – амплітудне (максимальне) значення струму, А;

$i$  – миттєве значення струму, А.

На рисунку 2.3 наведений графік залежності синусоїдного струму від часу  $i = f(t)$ .

Кутова швидкість обертання рамки залежить від частоти, тобто від кількості оборотів за секунду, за виразом

$$\omega = 2\pi \cdot f, \quad (2.7)$$

де  $f$  – частота обертання рамки, Гц.

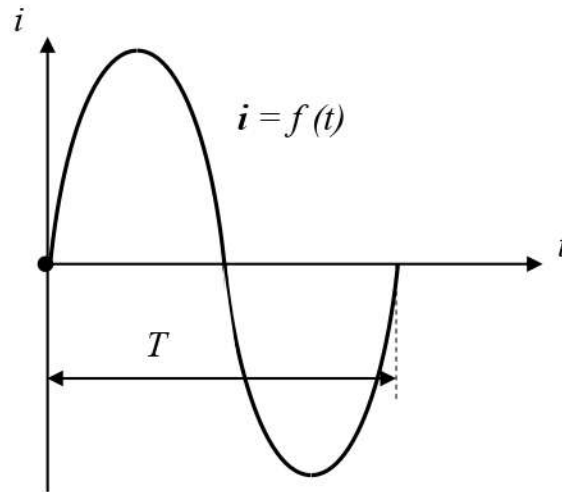


Рисунок 2.3 – Графік залежності синусоїдного струму від часу  $i = f(t)$

Слід відзначити, що з такою ж самою частотою  $f$  буде змінюватися й електричний струм. Час одного обороту, за який проходить повне коливання струму, має назву **період струму**,  $T$ . У Європі частота струму дорівнює  $50 \text{ Гц}$ , тобто  $f = 50 \text{ Гц}$  ( $1/c$ ), а період струму дорівнює  $T = 0,02 \text{ c}$ , тобто

$$T = \frac{1}{f}. \quad (2.8)$$

Величина, яка визначається за виразом (2.9), має назву **кутова швидкість обертання рамки**

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}. \quad (2.9)$$

Синусоїдні величини (струми, напруги, е.р.с., потенціали) зображуються на площині за допомогою векторів. Для цього амплітудне значення синусоїдної величини в обраному масштабі відкладається у вигляді відрізка під кутом до осі відліку, який дорівнює початковій фазі синусоїдної величини. Якщо початкова фаза позитивна, то кут відліку відкладається проти годинникової стрілки, якщо негативна – за годинниковою стрілкою. Наприклад, е.р.с.  $e = E_m \sin(\omega t + 45^\circ)$ ,  $B$ , зображена на рисунку 2.4. У вигляді вектора е.р.с. зображається для моменту часу  $t = 0$ . Миттєве значення е.р.с. в будь-який інший момент часу (іншої фази е.р.с.) є проекція вектора на вертикальну вісь – рисунок 2.4.

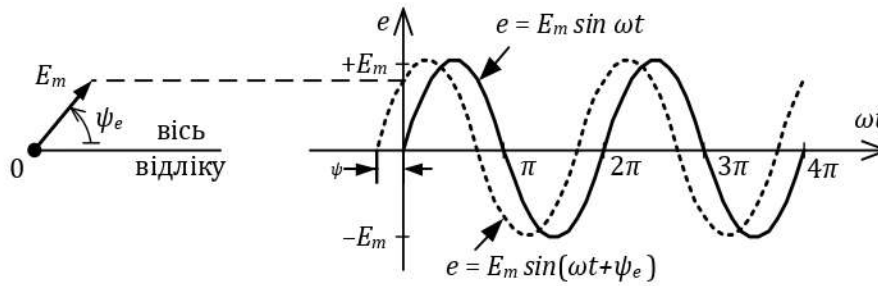


Рисунок 2.4 – Векторна та волнова діаграми е.р.с з початковою фазою  $\psi_e$

Якщо рамку генератора замкнути за допомогою щіткового механізму на резистор, то виникає синусоїдний струм, який описується рівнянням

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \quad (2.10)$$

**Діюче значення змінного синусоїдного струму** – це величина еквівалентна постійному струму, при якому за період виділиться така ж кількість тепла в тому ж провіднику, що й при змінному струмі. Величина діючого значення змінного синусоїдного струму визначається за виразом

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.11)$$

За аналогією діючі значення е.р.с. і напруги визначається за виразами відповідно

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \quad (2.12)$$

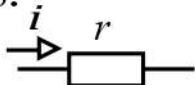
$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.13)$$

Електровимірювальні прилади вимірюють діючі значення величин: амперметр вимірює величину сили струму, вольтметр – величину напруги, ватметр – величину активної потужності.

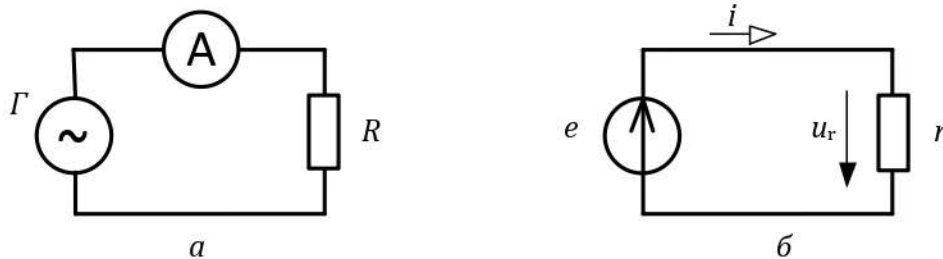
## 2.2 Коло змінного синусоїдного струму з резистором

При проходженні по провіднику змінного синусоїдного струму активний опір провідника залежить від частоти струму. При цьому, в результаті витиснення струму на поверхню провідника переріз провідника як би зменшується, що приводить до збільшення його опору в порівнянні з постійним стру-

мом. Процес витиснення струму на поверхню провідника виникає внаслідок явища електромагнітної індукції та має назву **поверхневий ефект**. Змінне магнітне поле навколо провідника, створене змінним струмом у провіднику, наводить е.р.с. самоіндукції. Якщо уявити провідник у вигляді безлічі паралельних ниток, по яких проходять свої струми, то найбільша кількість магнітних силових ліній буде зчеплена з центральними нитками і там буде наводитися найбільша е.р.с., яка перешкоджає струму і витісняє його на поверхню.

На розрахункових схемах активний опір зображується так 

На рисунку 2.5.а наведене електричне коло синусоїдного струму, яке містить генератор синусоїдного струму  $\Gamma$  та ідеальний резистор  $R$ . На рисунку 2.5.б наведена схема електрична розрахункова електричного кола синусоїдного струму з резистором: генератор не має активного опору й індуктивності, тому то є **ідеальним**, опором амперметра і з'єднувальних проводів можна знехтувати. У генераторі створюється е.р.с., як наслідок, у колі протікає струм, а в резисторі спостерігається явище теплової дії струму.



а – схема електрична принципова; б – схема електрична розрахункова

Рисунок 2.5 – Електричне коло синусоїдного струму з резистором

Елемент  $r$  має назву **активний опір**. Закон Ома для миттєвих значень описується виразом

$$u_r = r \cdot i. \quad (2.14)$$

Так як напруга, яка прикладена до резистора, синусоїдна, струм теж є синусоїдним, тоді

$$u_r = U_{rm} \sin(\omega t + \psi_u); \quad (2.15)$$



$$i = \frac{U_{rm}}{r} \sin(\omega t + \psi_i) ; \quad (2.16)$$

$$I_m = \frac{U_{rm}}{r} . \quad (2.17)$$

Якщо поділити праву і ліву частини виразу (2.17) на  $\sqrt{2}$ , то запис закону Ома для діючих значень напруг та струмів резистора має вигляд

$$I = \frac{U_r}{r} . \quad (2.18)$$

На рисунку 2.6 наведені векторна та волнова діаграми напруги та струму у колі з резистором.

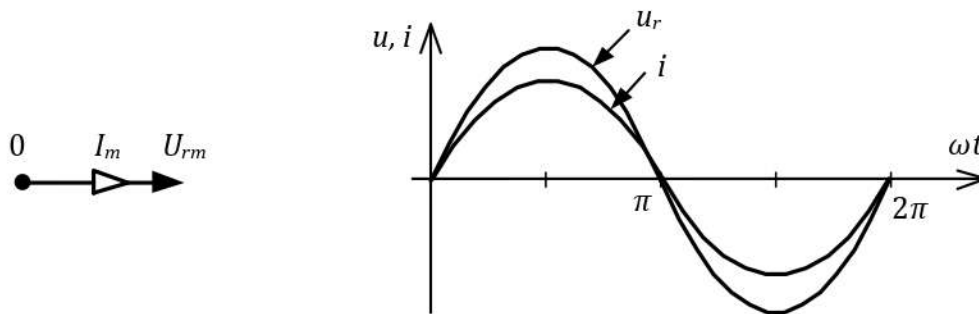


Рисунок 2.6 – Векторна та волнова діаграми напруги і струму у колі з резистором

**Кут зсуву фаз** – це абсолютне значення різниці початкових фаз напруги і струму згідно виразу

$$\varphi = |\psi_u - \psi_i| , \quad (2.19)$$

де  $\varphi$  – кут зсуву фаз, град.;

$\psi_u$  – початкова фаза напруги, град.;

$\psi_i$  – початкова фаза струму, град.

Слід зазначити, що для електричного кола з активним опором кут зсуву фаз дорівнює нулю:  $\varphi = 0$ , тобто **напруга і струм на ділянці кола з активним опором співпадають за фазою**. Активна потужність у колі з резистором – це середнє значення потужності за період, яке дорівнює

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T r \cdot i^2 dt; \quad (2.20)$$

$$P = r \cdot I^2. \quad (2.21)$$

Енергія, що виділяється в резисторі за період, дорівнює

$$W = \int_0^T p dt = P \cdot t = r \cdot I^2 \cdot t, \quad (2.22)$$

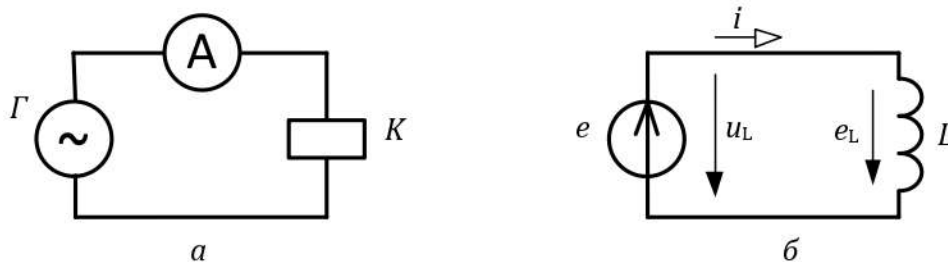
де  $t$  – час роботи установки,  $c$ .

Таким чином, **активна потужність** – це енергія, яка виділяється в активному опорі за одиницю часу, та яка дорівнює

$$P = \frac{W}{t} = r \cdot I^2. \quad (2.23)$$

### 2.3 Коло змінного синусоїдного струму з ідеальною котушкою

**Ідеальна котушка** – це така котушка, у якої активний опір дорівнює нулю. На рисунку 2.7, *а* наведена схема електрична принципова включення ідеальної котушки до кола змінного синусоїдного струму, а на рисунку 2.7, *б* наведена розрахункова схема кола, при цьому опорамі амперметра і з'єднувальних проводів нехтують.



*а* – схема електрична принципова; *б* – схема електрична розрахункова

Рисунок 2.7 – Електричне коло з ідеальною котушкою індуктивності

Елемент  $L$  має назву **індуктивність котушки**. Параметр  $L$  характеризує здатність елемента електричного поля створювати магнітне поле при протіканні по ньому електричного струму. Якщо струм постійний, то ідеальна котушка

індуктивності  $L$  не має електричного опору, оскільки її активний опір дорівнює нулю і не гріється. Спад напруги на такому елементі дорівнює нулю.

В електричному колі змінного струму ідеальний елемент  $L$  створює навколо себе змінне магнітне поле, яке індукує у витках котушки е.р.с. самоіндукції  $e_L$ . Ця е.р.с. є реакцією елемента  $L$  на появу змінного магнітного поля, тому її можна назвати **реактивною**. Внаслідок появи цієї е.р.с. на ідеальній котушці індуктивності з'являється напруга  $u_L$ , яка дорівнює

$$u_L = L \frac{di}{dt}. \quad (2.24)$$

Цей вираз характеризує співвідношення між миттєвим значенням струму і напруги на індуктивності. Якщо через елемент  $L$  протікає струм  $i$  при напрузі  $u_L$ , то такий елемент створює електричний опір струму. Цей опір елемента  $L$  можна вважати реактивним, оскільки він існує тільки при наявності змінного струму в елементі, як реакція на створення змінного магнітного поля. Синусоїдальна е.р.с. джерела  $e$  дорівнює напрузі на індуктивності

$$e = u_L = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (2.25)$$

а у колі протікає синусоїдний струм  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ , тоді напруга у колі дорівнюватиме

$$\begin{aligned} u = u_L &= U_m \sin(\omega t + \psi_u) = \omega \cdot L \cdot I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \\ &= x_L \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u). \end{aligned} \quad (2.26)$$

Величина  $\omega L$  позначається  $x_L$  і має назву **реактивний індуктивний опір** котушки, тобто

$$x_L = \omega \cdot L. \quad (2.27)$$

Реактивний опір має розмірність  $Ом$ .

Запис закону Ома для амплітудних та діючих значень струмів відповідно має вигляд

$$I_m = \frac{U_{Lm}}{x_L} = \frac{U_{Lm}}{\omega \cdot L}; \quad I = \frac{U_L}{x_L} = \frac{U_L}{\omega \cdot L}. \quad (2.28)$$

На рисунку 2.8 наведені векторна та волнова діаграми напруги і струму у колі з ідеальною котушкою індуктивності.

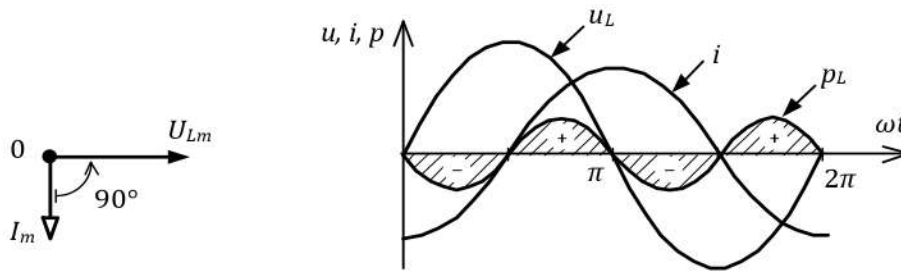


Рисунок 2.8 – Векторна та волнова діаграми напруги і струму у колі з ідеальною котушкою індуктивності

З рівняння (2.26) видно, що початкова фаза напруги на індуктивності йде попереду від початкової фази струму на кут  $\pi / 2$  або на  $90^\circ$

$$\psi_u = \psi_i + 90^\circ. \quad (2.29)$$

Кут зсуву фаз між напругою і струмом в індуктивності дорівнює

$$\varphi = |\psi_u - \psi_i| = |0 - (-90^\circ)| = 90^\circ. \quad (2.30)$$

Отже, **напруга на індуктивності випереджує струм на кут  $\pi / 2$  або на  $90^\circ$ .**

Миттєва потужність в індуктивності дорівнює

$$\begin{aligned} p_L &= u_L \cdot i = U_{Lm} \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \frac{1}{2} \cdot U_{Lm} I_m \cdot \sin 2\omega t = \\ &= U_L I \cdot \sin 2\omega t = x_L I^2 \cdot \sin 2\omega t = Q_L \cdot \sin 2\omega t, \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\text{де } Q_L = x_L \cdot I^2. \quad (2.32)$$

Величина  $Q_L$  має назву **реактивна потужність котушки**. Одиниця вимірювання реактивної потужності *вар*.

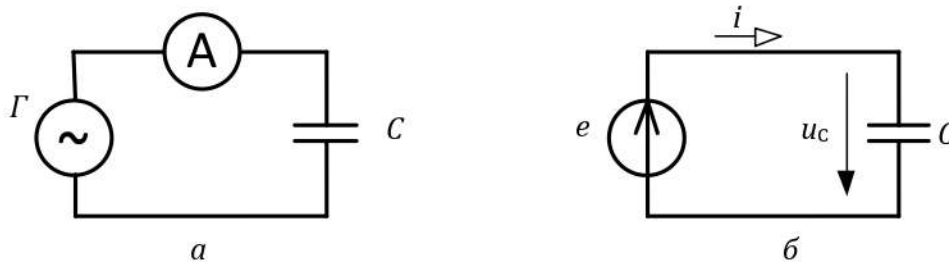
Активна потужність в індуктивності як середнє значення потужності за період дорівнює

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_L dt = 0. \quad (2.33)$$

Таким чином, енергія в індуктивності не виділяється у вигляді тепла, а відбувається обмін енергією між джерелом і приймачем.

## 2.4 Коло змінного струму з ідеальним конденсатором

Ідеальний конденсатор – це такий конденсатор, у якому активний опір дорівнює нескінченності. На рисунку 2.9, *а* наведена схема електрична принципова включення ідеального конденсатора до кола змінного синусоїдного струму, а на рисунку 2.9, *б* наведена розрахункова схема кола, при цьому опорами амперметра і з'єднувальних проводів нехтують.



*а* – схема електрична принципова; *б* – схема електрична розрахункова

Рисунок 2.9 – Електричне коло з ідеальним конденсатором

Елемент *С* має назву **ємність**. Параметр *С* характеризує здатність елемента електричного поля накопичувати електричне поле при прикладенні до нього напруги. Якщо напруга постійна, то ідеальний конденсатор *С* не пропускає електричний струм, оскільки його активний опір дорівнює нескінченності. У колі ж змінного струму відбувається постійне переміщення електричних зарядів в ідеальному елементі *С*. При збільшенні напруги струм в колі конденсатора буде зарядним, а при зменшенні – розрядним. Заряд в конденсаторі дорівнює

$$q = C \cdot u_c, \quad (2.34)$$

де *q* – заряд конденсатора, Кл;

*С* – ємність конденсатора, Ф;

*u<sub>c</sub>* – напруга на конденсаторі, В.

Миттєвий струм в колі дорівнює швидкості зміни заряду конденсатора і становить

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}. \quad (2.35)$$

Цей вираз характеризує співвідношення між миттєвим значенням сили струму і напруги на ємності. Якщо через елемент  $C$  протікає струм  $i$  при напрузі  $u_c$ , то такий елемент створює електричний опір струму. Цей опір елемента  $C$  можна вважати реактивним, оскільки він існує тільки при прикладенні змінної напруги до елемента, як реакція на постійне переміщення електричних зарядів. При підключенні ідеального конденсатора до джерела синусоїдної е.р.с.  $e$  в електричному колі протікатиме струм

$$\begin{aligned} i &= C \frac{du}{dt} = C \frac{d}{dt} U_m \sin(\omega t + \psi_u) = \omega \cdot C \cdot U_m \cos(\omega t + \psi_u) = \\ &= \frac{U_m}{x_C} \sin(\omega t + \psi_u + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \end{aligned} \quad (2.36)$$

Величина  $\frac{1}{\omega \cdot C}$  позначається  $x_C$  і має назву **реактивний ємнісний опір** конденсатора, тобто

$$x_C = \frac{1}{\omega \cdot C}. \quad (2.37)$$

Реактивний опір має розмірність  $Ом$ .

Запис закону Ома для амплітудних та діючих значень струмів відповідно має вигляд

$$I_m = \frac{U_{cm}}{x_C}; \quad I = \frac{U_C}{x_C}. \quad (2.38)$$

На рисунку 2.10 наведені векторна та хвильова діаграми напруги і струму у колі з ідеальним конденсатором. З рівняння (2.36) видно, що початкова фаза напруги на конденсаторі дорівнює

$$\psi_u = \psi_i - 90^\circ. \quad (2.39)$$

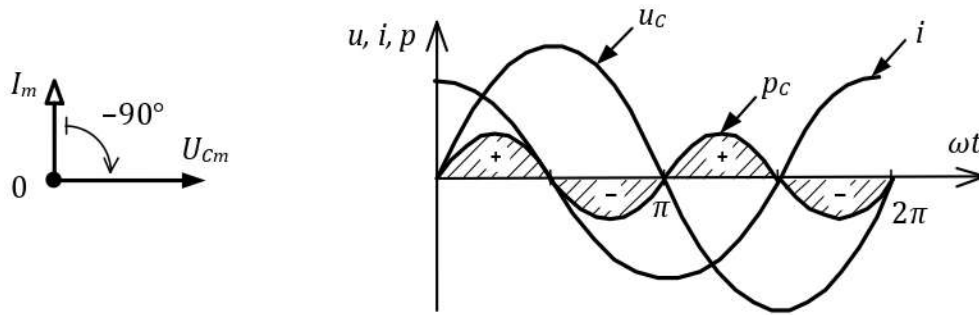


Рисунок 2.10 – Векторна та волнова діаграми напруги і струму у колі з ідеальною котушкою індуктивності

Кут зсуву фаз між напругою і струмом в ємності дорівнює

$$\varphi = |\psi_u - \psi_i| = |0 - (-90^\circ)| = 90^\circ. \quad (2.40)$$

Отже, напруга на ємності відстає від струму на кут  $\pi/2$  або на  $90^\circ$ .

Миттєва потужність в ємності індуктивності дорівнює

$$\begin{aligned} p_c &= u_c \cdot i = U_{cm} \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = \frac{1}{2} \cdot U_{cm} I_m \cdot \sin 2\omega t = \\ &= U_c \cdot I \cdot \sin 2\omega t = x_c I^2 \cdot \sin 2\omega t = Q_c \cdot \sin 2\omega t, \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$\text{де } Q_c = x_c \cdot I^2. \quad (2.42)$$

Величину  $Q_c$  має назву **реактивна потужність** конденсатора. Одиницею вимірювання реактивної потужності є *вар*.

Активна потужність в ємності як середнє значення потужності за період дорівнює

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_L dt = 0. \quad (2.43)$$

Таким чином, **енергія в ємності не виділяється у вигляді тепла, а відбувається обмін енергією між джерелом і приймачем.**

## Лекція 4

### ТЕМА 2 НЕРОЗГАЛУЖЕНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

#### План лекції

- 2.5 Реальна котушка в колі змінного синусоїдного струму
- 2.6 Коло змінного синусоїдного струму з резистором і конденсатором
- 2.7 Коло змінного синусоїдного струму з послідовно з'єднаними котушкою і конденсатором
- 2.8 Резонанс напруг
- 2.9 Лінія електропередачі

#### 2.5 Реальна котушка в колі змінного синусоїдного струму

При підключенні котушки індуктивності у коло змінного синусоїдного струму спостерігаються такі фізичні явища і процеси:

- під дією синусоїдної е.р.с. джерела в котушці протікає струм  $i$ ;
- спостерігається теплова дія струму і котушка нагрівається;
- змінний синусоїдний струм створює змінне магнітне поле, яке пронизує цю ж котушку, спостерігається явище електромагнітної індукції (самоіндукції) і в котушці наводиться е.р.с. самоіндукції  $e_L$ .

Розрахункова схема кола реальної котушки наведена на рисунку 2.11.

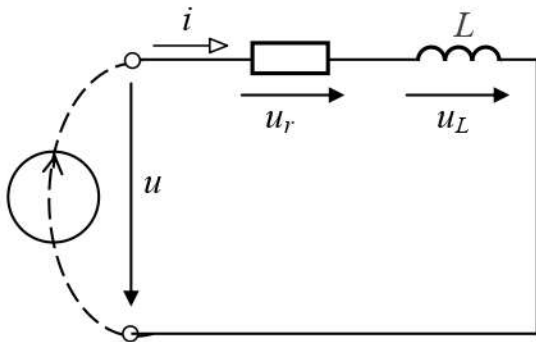


Рисунок 2.11 –  
Розрахункова схема кола  
реальної котушки

Рівняння електричної рівноваги для цього кола має вигляд

$$u = u_r + u_L; \quad (2.44)$$

$$u = r \cdot i + L \frac{di}{dt}. \quad (2.45)$$

Струм у колі дорівнює

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (2.46)$$

Напруга  $u$  визначається за виразом з урахуванням виразів (2.44)...(2.46) і дорівнює



$$u = r \cdot I_m \sin \omega t + L \frac{d}{dt} I_m \sin \omega t = r \cdot I_m \sin \omega t + \omega \cdot L \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ); \quad (2.47)$$

$$U_m = r \cdot I_m; \quad (2.48)$$

$$U_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_m = x_L \cdot I_m; \quad (2.49)$$

$$u = U_m \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (2.50)$$

На рисунку 2.12 наведена векторна діаграма струму і напруги кола з реальною котушкою.

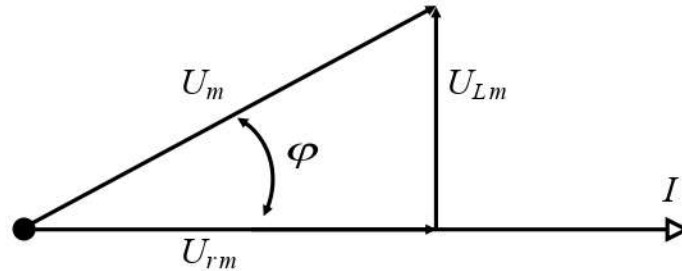


Рисунок 2.12 - Векторна діаграма струму і напруги кола з реальною котушкою

Так як  $\psi_u = \psi_i + \varphi$ , отже, миттєва напруга кола буде дорівнювати

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi), \quad (2.51)$$

як видно з рисунку 2.12  $\psi_i = 0$ , тому то  $\psi_u = \varphi$ .

Якщо з діаграми струму та напруг (див. рисунок 2.12) виділити діаграму напруг, то отримаємо трикутник напруг – рисунок 2.13.

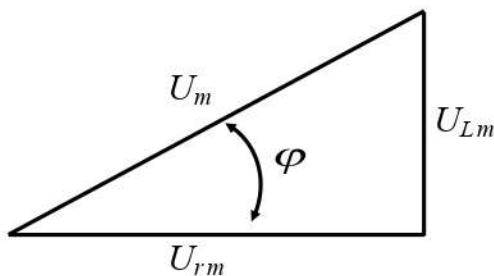


Рисунок 2.13 – Трикутник напруг

Сторони трикутника дорівнюють

$$U_m = r \cdot I_m; \quad (2.52)$$

$$U_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_m = x_L \cdot I_m; \quad (2.53)$$

$$U_m = z \cdot I_m, \quad (2.54)$$

де  $r$  – активний опір котушки, Ом;  
 $x$  – реактивний опір котушки, Ом;  
 $z$  – повний опір котушки, Ом.

Якщо поділити сторони трикутника напруг на  $I_m$ , то виникає трикутник опорів, який наведений на рисунку 2.14.

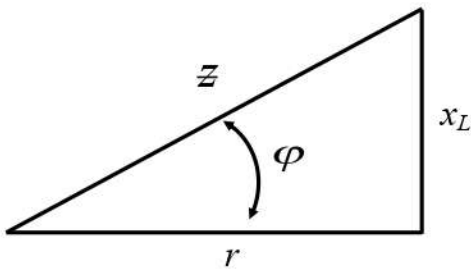


Рисунок 2.14 –  
Трикутник опорів

Повний опір кола котушки змінному струму дорівнює

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}. \quad (2.55)$$

Кут зсуву фаз у котушці визначається через параметри котушки  $(r, x, z)$  за виразом

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z}. \quad (2.56)$$

Якщо помножити сторони трикутника опорів на квадрат діючого значення струму, то виникає трикутник потужностей, який наведений на рисунку 2.15.

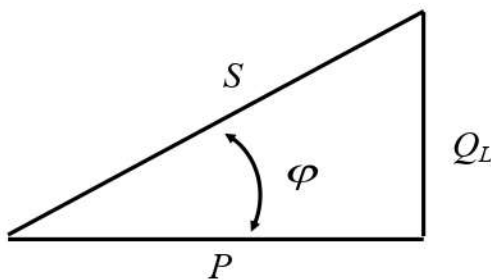


Рисунок 2.15 – Трикутник  
потужностей

Сторони такого трикутника – це величини потужності, які визначаються за виразами

$$\text{активна } P = r \cdot I^2, \text{ Вт}; \quad (2.57)$$

$$\text{реактивна } Q_L = x_L \cdot I^2, \text{ вар}; \quad (2.58)$$

$$\text{повну } S = z \cdot I^2, \text{ ва}. \quad (2.59)$$

**Коефіцієнт потужності кола,  $\cos \varphi$**  – це відношення активної потужності  $P$  до повної  $S$ .

## 2.6 Коло змінного синусоїдного струму з резистором і конденсатором

При підключенні до кола змінного синусоїдного струму послідовно резистора і конденсатора спостерігаються такі фізичні явища і процеси:

- під дією синусоїдної е.р.с. джерела в колі протікає струм  $i$ ;
- спостерігається теплова дія струму і резистор нагрівається;
- змінна синусоїдна напруга призводить до постійного перезарядження конденсатора, а у колі протікає струм заряду або розряду конденсатора  $i$ .

На рисунку 2.16 наведена розрахункова схема електричного кола з послідовно з'єднаними резистором і конденсатором.

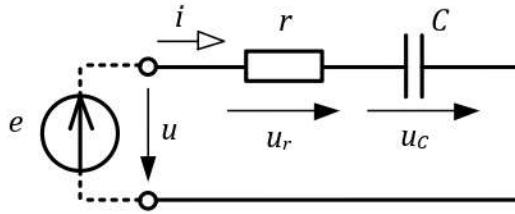


Рисунок 2.16 – Розрахункова схема електричного кола з послідовно з’єднаними резистором і конденсатором

Згідно другого закону Кірхгофа для схеми (див. рисунок 2.16), при обході за годинниковою стрілкою для миттєвих значень напруг отримано, що

$$u = u_r + u_c; \quad (2.60)$$

$$U_{rm} = r \cdot I_m; \quad (2.61)$$

$$U_{cm} = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I_m = X_C \cdot I_m; \quad (2.62)$$

$$u = U_{rm} \sin \omega t + U_{cm} \sin(\omega t - 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (2.63)$$

На рисунку 2.17 наведена векторна діаграма струму і напруги електричного кола з резистором та з конденсатором.

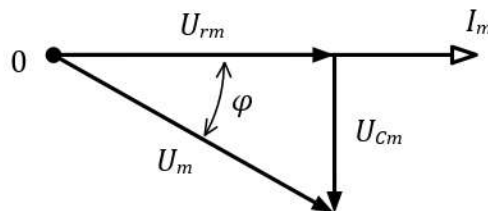


Рисунок 2.17 – Векторна діаграма струмів і напруг електричного кола з резистором і конденсатором

Так як  $\psi_u = \psi_i - \varphi$ , отже, миттєва напруга на затискачах кола дорівнює

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_i - \varphi). \quad (2.64)$$

На рисунку 2.18 наведений трикутник напруг електричного кола з резистором і конденсатором.

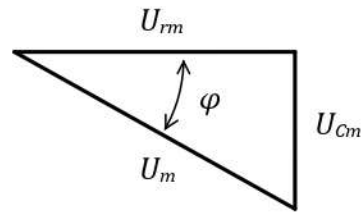


Рисунок 2.18 – Трикутник напруг електричного кола з резистором і конденсатором

Сторони трикутника напруг дорівнюють

$$U_{rm} = r \cdot I_m; \quad (2.65)$$

$$U_{cm} = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m = X_C \cdot I_m; \quad (2.66)$$

$$U_m = z \cdot I_m; \quad (2.67)$$

де  $r$  – активний опір кола, Ом;

$x_L$  – реактивний опір кола, Ом;

$z$  – повний опір кола, Ом.

На рисунку 2.19 наведений трикутник опорів електричного кола з резистором і конденсатором.

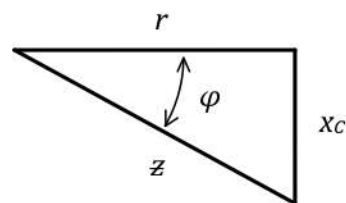


Рисунок 2.19 – Трикутник опорів електричного кола з резистором і конденсатором

Повний опір кола з резистором та конденсатором дорівнює

$$z = \sqrt{r^2 + X_C^2}. \quad (2.68)$$

Кут зсуву фаз такого кола дорівнює

$$\varphi = \arccos \frac{r}{Z}. \quad (2.69)$$

На рисунку 2.20 наведений трикутник потужностей електричного кола з резистором і конденсатором.

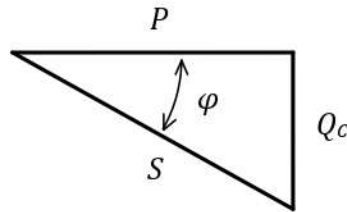


Рисунок 2.20 – Трикутник потужностей електричного кола з резистором і конденсатором

Сторони трикутника такого трикутника – це потужності, які визначаються за виразами

активна:  $P = r \cdot I^2;$   $Вт;$  (2.70)

реактивна:  $Q_C = X_C \cdot I^2;$   $Вар;$  (2.71)

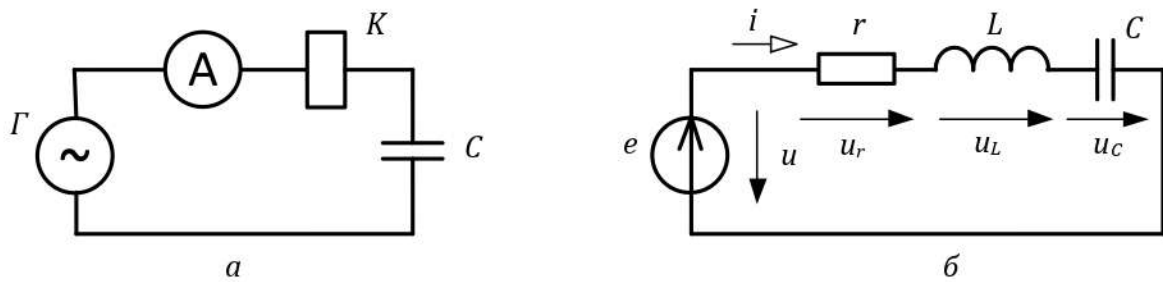
повна:  $S = Z \cdot I^2;$   $В \cdot А.$  (2.72)

Коефіцієнт потужності кола чисельно дорівнює відношенню, згідно виразу

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (2.73)$$

## 2.7 Коло змінного синусоїдного струму з послідовно з'єднаними котушкою і конденсатором

Підключимо до ідеального джерела синусоїдної е.р.с. послідовно котушку і конденсатор – рисунок 2.21, а. Складемо розрахункову схему кола з урахуванням, що в кожному елементі кола спостерігаються фізичні явища і процеси, які описані в пунктах 2.6 і 2.7 – рисунок 2.21, б.



*a* – схема електрична принципова; *б* – схема електрична розрахункова

Рисунок 2.21 – Електричне коло з послідовно з'єднаними котушкою і конденсатором

Якщо струм у колі  $i = I_m \sin \omega t$ , то напруга на затискачах кола  $u$  за другим законом Кірхгофа визначається за рівнянням

$$u = r \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt; \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned} u &= r \cdot I_m \sin \omega t + \omega L \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \\ &= U_{rm} \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ) + U_{cm} \sin(\omega t - 90^\circ), \end{aligned} \quad (2.75)$$

де

$$U_{rm} = r \cdot I_m; \quad (2.76)$$

$$U_{Lm} = \omega L \cdot I_m; \quad (2.77)$$

$$U_{cm} = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m. \quad (2.78)$$

На рисунку 2.22 наведена векторна діаграма струмів і напруг кола з котушкою і конденсатором, а на рисунку 2.23 - трикутник напруг кола.

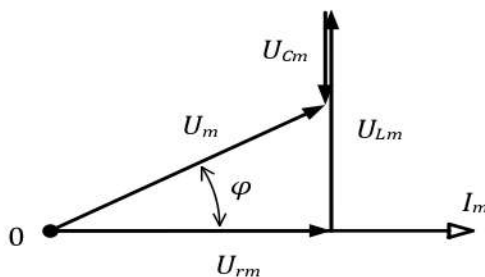


Рисунок 2.22 – Векторна діаграма струмів і напруг кола з котушкою і конденсатором

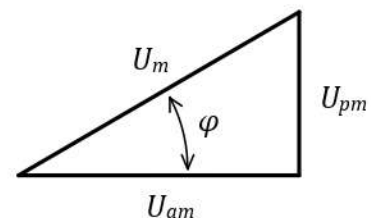


Рисунок 2.23 – Трикутник напруг кола

Активна складова напруги дорівнює

$$U_{\text{ам}} = rI_{\text{м}}. \quad (2.79)$$

Реактивна складова напруги дорівнює

$$U_{\text{рм}} = (x_L - x_C) \cdot I_{\text{м}} = x \cdot I_{\text{м}}, \quad (2.80)$$

де  $x$  – реактивний опір кола, Ом.

Якщо  $x_L > x_C$ , то реактивний опір кола буде носити **індуктивний** характер, якщо  $x_L < x_C$ , то реактивний опір кола буде носити **ємнісний** характер, тобто в першому випадку еквівалентною схемою кола (розрахунковою) буде наступна – рисунок 2.24. В другому випадку еквівалентна розрахункова схема кола буде мати такий вигляд – рисунок 2.25.

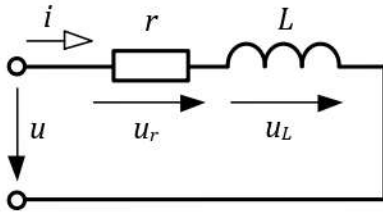


Рисунок 2.24 – Розрахункова схема при індуктивному характері кола

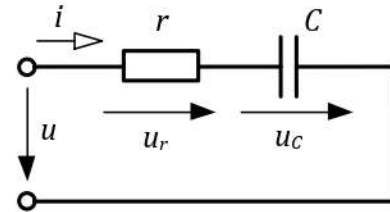


Рисунок 2.25 – Розрахункова схема при ємнісному характері кола

При діленні сторін трикутника напруг на величину  $I_{\text{м}}$  отримуємо трикутник опорів – рисунок 2.26.

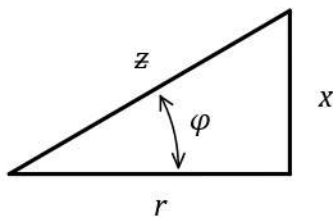


Рисунок 2.26 – Трикутник опорів кола

Повний опір кола визначається за формулою

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}. \quad (2.81)$$

Закон Ома для максимальних значень напруги і струму має вигляд

$$I_{\text{м}} = \frac{U_{\text{м}}}{z}. \quad (2.82)$$

Закон Ома для діючих значень напруги і струму має вигляд

$$I = \frac{U}{z}. \quad (2.83)$$

При множенні сторін трикутника опорів на квадрат діючого значення струму отримуємо трикутник потужностей – рисунок 2.27.

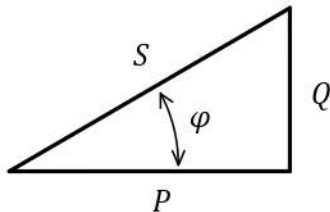


Рисунок 2.27 – Трикутник потужностей кола

У даному випадку:

$$\text{активна:} \quad P = r \cdot I^2; \quad \text{Вт}; \quad (2.84)$$

$$\text{реактивна:} \quad Q = x \cdot I^2; \quad \text{вар}; \quad (2.85)$$

$$\text{повна:} \quad S = z \cdot I^2; \quad \text{В}\cdot\text{А}. \quad (2.86)$$

Коефіцієнт потужності кола

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi. \quad (2.87)$$

Кут зсуву фаз кола визначається за виразом

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z}. \quad (2.88)$$

## 2.8 Резонанс напруг

Реактивні індуктивні та ємнісні опори кола змінного струму можуть повністю врівноважити один одного, як це витікає з пункту 2.7, в цьому випадку в колі виникає **резонанс**. При резонансі опір кола є чисто активним, кут зсуву фаз між напругою та струмом в колі дорівнює нулю, а  $\cos \varphi = 1$ .

Розглянемо розрахункову схему кола змінного синусоїдного струму з активним опором, індуктивністю і ємністю, у якій один з параметрів кола є змінною величиною, наприклад, ємність – рисунок 2.28.

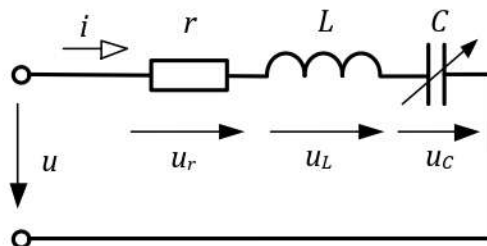


Рисунок 2.28 – Розрахункова схема кола при резонансі напруг



Розглянемо режим роботи кола у випадку, коли  $x_C = x_L$ , повний опір кола при цьому визначається за виразом

$$z = r. \quad (2.89)$$

Сила струму в колі визначається за законом Ома

$$I = \frac{U}{r}. \quad (2.90)$$

Кут зсуву фаз у колі буде дорівнювати нулю, тобто  $\varphi = 0$ , коло буде споживати тільки активну потужність

$$P = r \cdot I^2. \quad (2.91)$$

Реактивна потужність кола дорівнює

$$Q = Q_L - Q_C = (x_L - x_C) \cdot I^2 = 0. \quad (2.92)$$

На рисунку 2.29 наведена векторна діаграма струму і напруг при резонансі напруг.

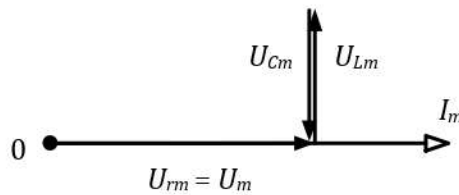


Рисунок 2.29 – Векторна діаграма струмів і напруг кола при резонансі напруг

**Резонанс напруг** – це такий режим кола, коли  $x_C = x_L$ . Розглянемо більш докладно умови виникнення резонансу напруг

$$x_C = x_L; \quad (2.93)$$

$$\frac{1}{\omega \cdot C} = \omega \cdot L. \quad (2.94)$$

З виразу (2.94) видно, що резонанс напруг виникає при зміні значення індуктивності  $L$  або ємності  $C$ , або при зміні частоти струму  $\omega$ .

**Резонансна частота** – це частота, при якій настає резонанс напруг при заданих параметрах кола  $L$  і  $C$ . Резонансна частота визначається за виразом з виразу (2.94)

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.95)$$

Резонанс напруг має такі характеристики:

- еквівалентний повний опір кола дорівнює активному опорі;
- кут зсуву фаз кола дорівнює нулю;
- коло споживає тільки активну потужність;
- коло не споживає реактивної потужності;
- напруга живлення врівноважується напругою на активному опорі;
- напруга на індуктивності та ємності дорівнюють одна одній і можуть значно перевищувати прикладену напругу;
- між індуктивністю і ємністю здійснюється безперервний обмін енергією: енергія електричного поля конденсатора переходить в енергію магнітного поля котушки і навпаки; при цьому сума миттєвих значень енергій у ємності й індуктивності залишається завжди постійною.

## 2.9 Лінія електропередачі

Питання теорії електричного кола, яке містить ідеальне джерело живлення, а через лінію електропередачі отримує живлення активно-індуктивне навантаження. На рисунку 2.30 наведена розрахункова схема такого кола, для якого  $e = u_1$ , опори прямого і зворотного проводів лінії  $r_L$  і  $x_L$  зосереджені в одному місці, навантаження характеризується параметрами  $r_H$  і  $x_H$ .

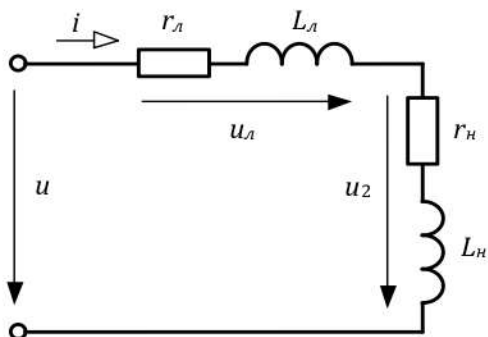


Рисунок 2.30 – Розрахункова схема кола з лінією електропередачі

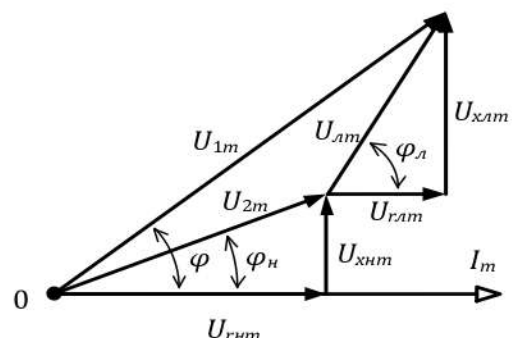


Рисунок 2.31 – Векторна діаграма струмів і напруг кола з лінією електропередачі

На рисунку 2.31 наведена векторна діаграма кола, де струм дорівнює  $i = I_m \sin \omega t$ . Діюче значення сили струму в колі визначається за виразом

$$I = \frac{U_1}{\sqrt{(r_{\text{л}} + r_{\text{н}})^2 + (x_{\text{л}} + x_{\text{н}})^2}}. \quad (2.96)$$

Діюче значення напруги на навантаженні дорівнює

$$U_2 = z_{\text{н}} \cdot I, \quad (2.97)$$

$$z_{\text{н}} = \sqrt{r_{\text{н}}^2 + x_{\text{н}}^2}. \quad (2.98)$$

Розглянемо три нових означення: **втрата напруги** в лінії, **падіння напруги** в лінії, **відхилення напруги** на затискачах приймача (навантаження).

**Втрата напруги в лінії** – це різниця між напругами на початку  $U_1$  і в кінці лінії  $U_2$  згідно виразу

$$\Delta U_{\text{л}} = U_1 - U_2. \quad (2.99)$$

**Падіння напруги в лінії** – це добуток повного опору лінії на діюче значення струму, що у ній протікає, згідно виразу

$$U_2 = z_{\text{н}} \cdot I, \quad (2.100)$$

**Відхилення напруги** на затискачах приймача (навантаження) – це різниця між напругою на навантаженні і номінальною напругою приймача  $U_{\text{н}}$ , під якою розуміється напруга, зазначена в паспорті приймача або на яку він розрахований при виготовленні згідно виразу

$$\delta U_{\text{л}} = U_2 - U_1. \quad (2.101)$$

Електричне коло з лінією електропередачі характеризується такими величинами:

- втрата активної потужності в лінії

$$\Delta P_{\text{л}} = r_{\text{л}} \cdot I^2; \quad (2.102)$$

- реактивна потужність лінії

$$\Delta Q_{\text{л}} = x_{\text{л}} \cdot I^2; \quad (2.103)$$

- повна потужність лінії

$$\Delta S_{\text{л}} = z_{\text{л}} \cdot I^2; \quad (2.104)$$

- коефіцієнт потужності лінії

$$\frac{\Delta P_{\text{л}}}{\Delta S_{\text{л}}} = \cos \varphi_{\text{л}}. \quad (2.105)$$

- кут зсуву фаз лінії

$$\varphi_{\text{л}} = \arccos \frac{r_{\text{л}}}{z_{\text{л}}}; \quad (2.106)$$

- активна потужність приймача (навантаження)

$$P_2 = r_{\text{н}} \cdot I^2; \quad (2.107)$$

- реактивна потужність приймача (навантаження)

$$Q_2 = x_{\text{н}} \cdot I^2; \quad (2.108)$$

- повна потужність приймача (навантаження)

$$S_2 = z_{\text{н}} \cdot I^2; \quad (2.109)$$

- коефіцієнт потужності приймача (навантаження)

$$\frac{P_2}{S_2} = \cos \varphi_{\text{н}}; \quad (2.110)$$

- кут зсуву фаз приймача (навантаження)

$$\varphi_{\text{н}} = \arccos \frac{r_{\text{н}}}{z_{\text{н}}}; \quad (2.111)$$

- загальний активний опір кола

$$r = r_{\text{л}} + r_{\text{н}}; \quad (2.112)$$

- загальний реактивний опір кола

$$x = x_{\text{л}} + x_{\text{н}}; \quad (2.113)$$

- повний опір кола визначається за виразом

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}; \quad (2.114)$$

- активна потужність кола визначається за виразом

$$P = r \cdot I^2; \quad (2.115)$$

- реактивна потужність кола

$$Q = x \cdot I^2; \quad (2.116)$$

- повна потужність кола

$$S = z \cdot I^2; \quad (2.117)$$

- коефіцієнт потужності кола

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi; \quad (2.118)$$

- кут зсуву фаз кола визначається за виразом

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z}. \quad (2.119)$$

### Контрольні запитання до теми 2

1. Поясніть суть явища електромагнетизму, сформулюйте закон електромагнетизму та наведіть його математичний запис.
2. Поясніть суть явища електромагнітної індукції, сформулюйте закон електромагнітної індукції та наведіть його математичний запис.
3. Опишіть конструктивну схему машинного генератора змінного синусоїдного струму та принцип його дії.
4. Що таке амплітуда та частота струму?
5. Що таке період струму та кутова частота струму?
6. Що таке початкова фаза струму та миттєва фаза струму?
7. Поясніть фізичну суть активного опору провідника змінному струму в порівнянні з опором провідника постійному струму.
8. Що таке індуктивність котушки? Від чого залежить її величина?
9. Поясніть як співвідносяться діючі та амплітудні значення величин е.р.с., струму та напруги.
10. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в резисторі у колі змінного синусоїдного струму.

11. Сформулюйте і математично запишіть закон Ома для діючих значень напруги і струму на ділянці кола з резистором.
12. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в ідеальній котушці у колі синусоїдного струму.
13. Сформулюйте і математично запишіть закон Ома для діючих значень напруги і струму на ділянці кола з індуктивністю.
14. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в ідеальному конденсаторі у колі синусоїдного струму.
15. Сформулюйте і математично запишіть закон Ома для діючих значень напруги і струму на ділянці кола з ємністю.
16. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в реальній котушці у колі змінного синусоїдного струму.
17. Охарактеризуйте зв'язок між параметрами реальної котушки за трикутником опорів. Як розрахувати кут зсуву фаз реальної котушки за допомогою її параметрів?
18. Охарактеризуйте зв'язок між потужностями реальної котушки за трикутником потужностей. Як розрахувати коефіцієнт потужності реальної котушки?
19. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються у колі змінного синусоїдного струму з послідовним з'єднанням реальної котушки й ідеального конденсатора.
20. Охарактеризуйте зв'язок між параметрами кола за трикутником опорів. Як розрахувати кут зсуву фаз кола за допомогою її параметрів?
21. Охарактеризуйте зв'язок між потужностями кола змінного синусоїдного струму з послідовним з'єднанням реальної котушки й ідеального конденсатора за трикутником потужностей. Як розрахувати коефіцієнт потужності кола?
22. Що таке резонанс напруг? Які існують умови виникнення резонансу напруг?
23. Опишіть фізичні явища, які спостерігаються в лінії електропередачі і навантаженні при живленні від джерела змінного синусоїдного струму.

## Список літератури для вивчення теми 1

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / В.І.Мілих, О.О.Шавьолкін. За ред. В.І.Мілих. – К.: Каравелла, 2007. – 688 с.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / Будіщев М.С. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
3. Овчаров В.В. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / В.В.Овчаров, О.Ю.Вовк. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.
4. Паначевний Б.І. Загальна електротехніка: теорія і практикум / Б.І. Паначевний, Ю.Ф. Свєргун. – Київ: Каравела, 2003. – 440 с.
5. Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. Ч.1. / Овчаров В.В. – Мелітополь: Люкс, 2007. – 389 с.

## Лекція 5

### ТЕМА 3 ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

#### План лекції

- 3.1 Трифазний генератор
- 3.2 Трифазні системи
- 3.3 З'єднання фаз генератора та навантаження за схемою «зірка»
- 3.4 З'єднання фаз навантаження за схемою «трикутник»
- 3.5 Потужності трифазного кола синусоїдного струму
- 3.6 Переключення навантаження зі схеми «зірка» на схему «трикутник»

#### 3.1 Трифазний генератор

**Трифазна система** – це електрична система, в якій діють три синусоїдні е.р.с., що індуковані в одному джерелі електроенергії і мають однакову частоту, але відрізняються одна від одної за фазою на  $1/3$  періоду  $T$ . Джерелом, що виробляє таку систему е.р.с., є трифазний синхронний генератор, який містить дві основні частини: статор і індуктор (ротор). На статорі розміщуються три самостійні обмотки, які складаються із трьох фаз: це три котушки або фазні обмотки А-х, В-у, С-z, які зсунуті за кутом на  $120^0$  одна відносно іншої.

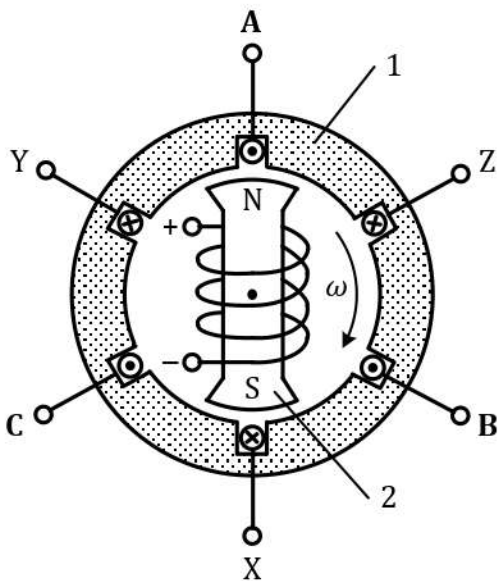


Рисунок 3.1 – Трифазний генератор

Індуктор, який містить осердя і обмотку збудження, обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ . По обмотці збудження проходить постійний струм, який створює магнітне поле. Магнітне поле індуктора індукує у фазних обмотках нерухомого статора е.р.с.  $e_A, e_B, e_C$  згідно закону електромагнітної індукції. Такі е.р.с. змінюються за синусоїдним законом.



Оскільки е.р.с. досягають максимального значення, коли осі обмоток статора і полюсів ротора збігаються, то зсув за фазою між трьома е.р.с. становить  $120^\circ$ . Обмотки генератора мають назву **фаза**, а сам генератор за кількістю фаз називається **трифазним**.

Часові функції трифазної системи е.р.с. зображені графічно на рисунку 3.1.а, а на рисунку 3.1.б наведена векторна діаграма трифазної системи е.р.с.

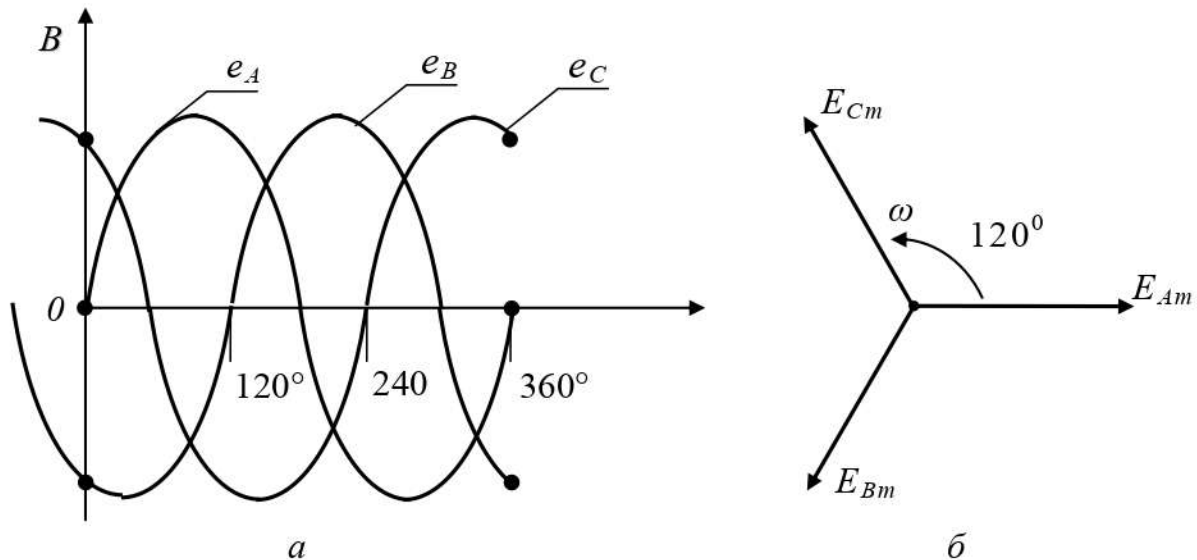


Рисунок 3.1 – Часові функції (а) та векторна діаграма е.р.с. (б) трифазної системи

Аналітичні вирази, які описують миттєві значення е.р.с. окремих фаз, мають вигляд

$$e_A = E_{Am} \sin \omega t ; \quad (3.1)$$

$$e_B = E_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ) ; \quad (3.2)$$

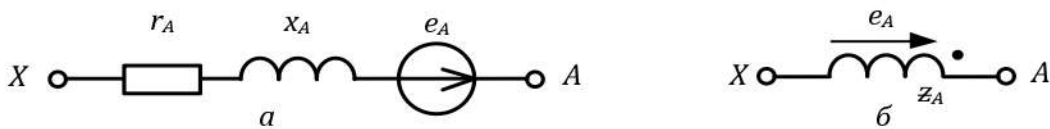
$$e_C = E_{Cm} \sin(\omega t + 120^\circ) . \quad (3.3)$$

### 3.2 Трифазні системи

**Трифазна система змінного струму** – це основа всіх електроенергетичних систем, тобто практично вся електроенергія країни виробляється на електростанціях трифазними синхронними генераторами, далі вона передається на відстань по трифазним лініям електропередачі та перетворюється трифазними

трансформаторами. Електричні мережі побутового та виробничого призначення можуть бути однофазними, але практично вони є тільки частиною трифазної системи. Приймачі електроенергії можуть бути одно- і трифазними. Основним трифазним приймачем електроенергії є трифазний асинхронний електродвигун.

Розрахункова схема фази генератора (наприклад, фази А) має вигляд, який зображений на рисунку 3.2, а, але частіше її показують так, як зображено на рисунку 3.2, б. На цих схемах  $r_A$ ,  $x_A$ ,  $z_A$  – це активний, реактивний і повний опори обмотки генератора відповідно.



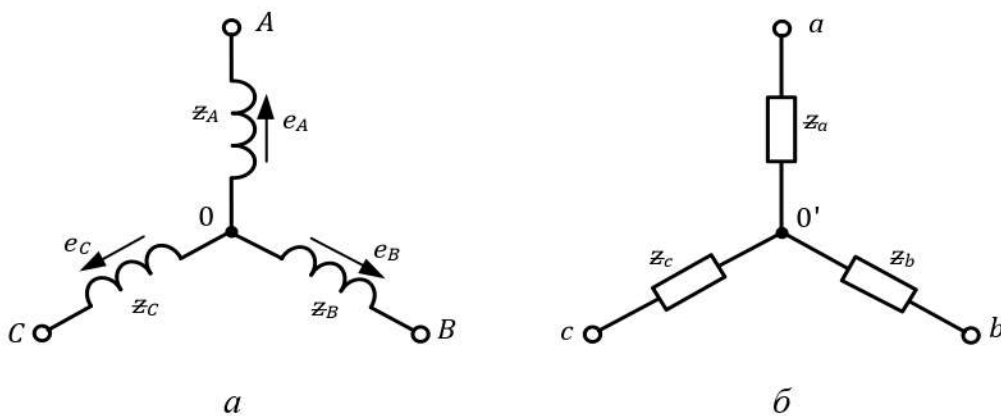
а – загальний вигляд фази; б – розповсюджений вигляд фази

Рисунок 3.2 – Розрахункова схема фази генератора

### 3.3 З'єднання фаз генератора та навантаження за схемою «зірка»

Три фази обмотки статора генератора або три фази навантаження можуть бути з'єднані двома основними способами: за схемою «зірка» та за схемою «трикутник».

**Схема з'єднання «зірка»** - це така схема, в якій кінці фаз  $x$ ,  $y$ ,  $z$  з'єднуються в один вузол  $0$  - нейтральну точку. На рисунку 3.3 наведена схема з'єднання «зірка» фаз генератора - рисунок 3.3.а, та схема з'єднання «зірка» фаз навантаження – рисунок 3.3.б.



а – генератора; б - навантаження

Рисунок 3.3 – З'єднання фаз за схемою «зірка»

Якщо фази генератора і навантаження, які з'єднані за схемою «зірка», поєднати між собою, то створиться **зв'язана трифазна чотирипровідна система** – рисунок 3.4. З початків фаз *A*, *B*, *C* виходять проводи, які мають назву **лінійні проводи**, а провід, який виходить з вузла 0 – це **нейтральний провід**.

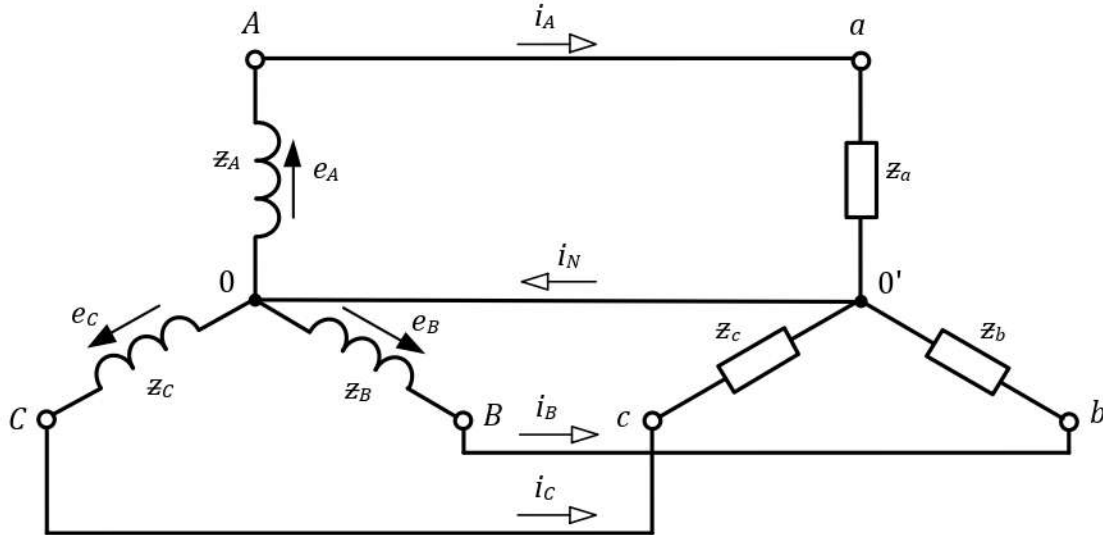


Рисунок 3.4 – Зв'язана трифазна чотирипровідна система

Відповідно струм, що проходить по лінійному проводу, є **лінійним струмом**, а по нульовому (нейтральному) проводу проходить **нульовий (нейтральний) струм**.

Схема з'єднання «зірка» має дві модифікації: «зірка» без нейтрального проводу (позначення *Y*) – це три провідна лінія електропередачі (ЛЕП), та «зірка» з нейтральним проводом (позначення *Y*-) – це чотирипровідна ЛЕП.

При з'єднанні фаз генератора або фаз навантаження за схемою «зірка» лінійна напруга та фазна напруга співвідносяться за класичним виразом

$$U_l = \sqrt{3} \cdot U_\phi. \quad (3.4)$$

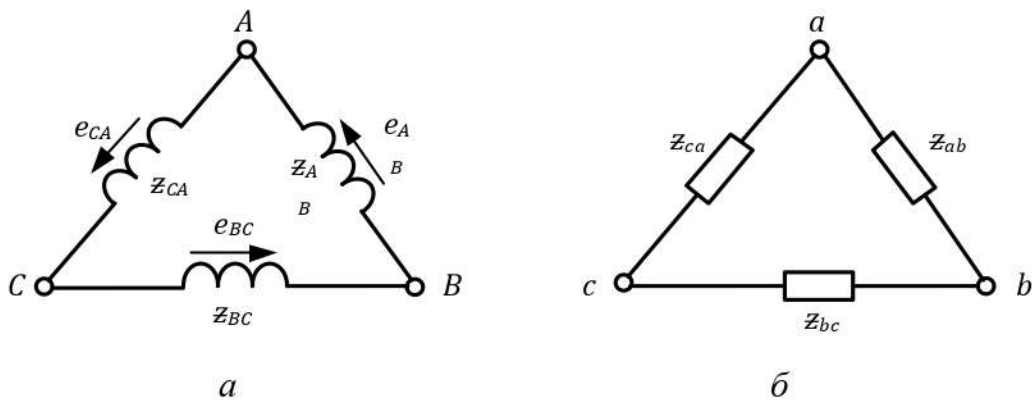
Існує номінальний ряд напруг фазних та лінійних відповідно: 127 В та 220 В; 220 В та 380 В; 380 В та 660 В; 660 В та 1147 В.

При цьому фазний струм, струм який проходить по фазі генератора або по фазі навантаження, співвідноситься з лінійним струмом за виразом

$$I_l = I_\phi. \quad (3.5)$$

### 3.4 З'єднання фаз генератора та фаз навантаження за схемою «трикутник»

Три фази генератора та три фази навантаження можна з'єднати за схемою «трикутника», при цьому кінець першої фази  $x$  з'єднується з початком другої фази  $B$ , кінець другої фази  $y$  з'єднується з початком третьої фази  $C$ , а кінець третьої фази  $z$  – з початком першої фази  $A$ . На рисунку 3.5 наведена схема з'єднання фаз генератора «трикутник» – рисунок 3.5.а та схема з'єднання фаз навантаження - рисунок 3.5.б.



а – генератора; б - навантаження

Рисунок 3.5 – З'єднання фаз за схемою «трикутник»

Якщо фази генератора і навантаження, які з'єднані за схемою «трикутник», поєднати між собою, то створиться зв'язана трифазна трипровідна система – рисунок 3.6.

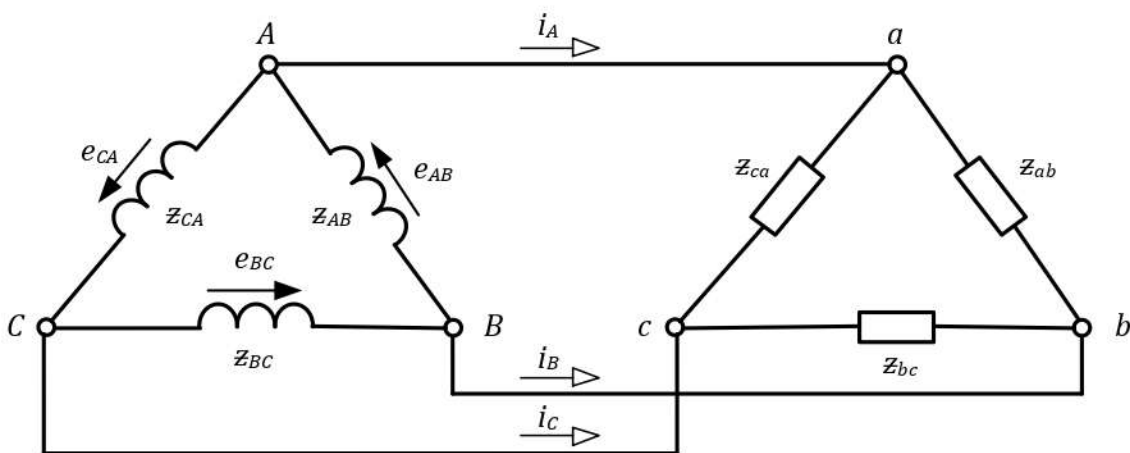


Рисунок 3.6 – Зв'язана трифазна трипровідна система

У цьому випадку від джерела йде три провідна ЛЕП з лінійними проводами  $A, B, C$  і існує тільки система лінійних напруг. При з'єднанні фаз генератора або фаз навантаження за схемою «трикутник» лінійна напруга та фазна напруга співвідносяться за класичним виразом

$$U_{л} = U_{\phi}. \quad (3.6)$$

При цьому фазний струм співвідноситься з лінійним струмом за виразом

$$I_{л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}. \quad (3.7)$$

### 3.5 Потужності трифазного кола

Кожна фаза трифазного навантаження споживає активну, реактивну і повну потужності. При симетричному навантаженні та схемі з'єднання фаз навантаження «зірка» ці потужності в кожній фазі визначаються за виразами

$$P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi; \quad (3.8)$$

$$Q_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi; \quad (3.9)$$

$$S_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi}. \quad (3.10)$$

Потужності, які споживають три фази навантаження, визначаються розрахунковим методом, при якому величини потужностей, які споживає одна фаза, слід помножити на кількість фаз навантаження (на 3) згідно виразів

$$P = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi; \quad (3.11)$$

$$P = 3 \cdot \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi; \quad (3.12)$$

$$Q = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi; \quad (3.13)$$

$$Q = 3 \cdot \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \cdot I_{л} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \sin \varphi; \quad (3.14)$$

$$S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi}; \quad (3.15)$$

$$S = 3 \cdot \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \cdot I_{л} = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л}. \quad (3.16)$$

При з'єднанні фаз навантаження «трикутник» вирази (3.11), (3.13) та (3.15) справедливі і є дієвими, тільки в цих виразах будуть свої фазні струми і напруги. Потужності через лінійні напруги і струми визначаються за виразами

$$P = 3 \cdot \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi; \quad (3.17)$$

$$Q = 3 \cdot \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \sin \varphi; \quad (3.18)$$

$$S = 3 \cdot \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}}. \quad (3.19)$$

Таким чином, потужності, які споживає трифазне навантаження незалежно від схеми його з'єднання, розраховуються за виразами

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi; \quad (3.20)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \sin \varphi; \quad (3.21)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}}. \quad (3.22)$$

### 3.6 Переключення навантаження зі схеми «зірка» на схему «трикутник»

Розглянемо основні співвідношення між струмами, а також між потужностями, при переключенні схеми з'єднання фаз навантаження «зірка» на схему «трикутник» – рисунок 3.7.

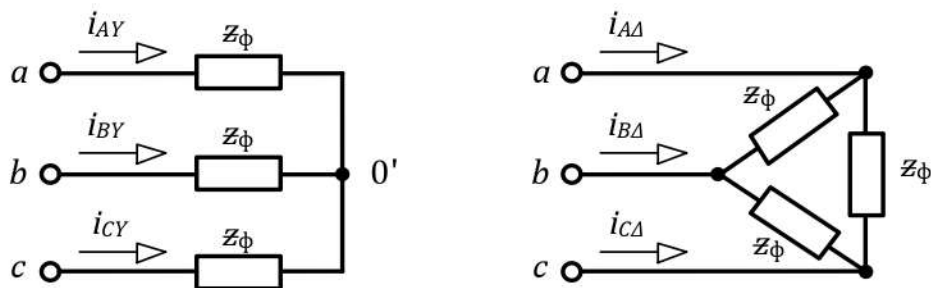


Рисунок 3.7 – Переключення схеми з'єднання фаз навантаження зі схеми «зірка» на схему «трикутник»

$$I_{лY} = I_{\phi Y} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} \cdot z_{\phi}}. \quad (3.23)$$

$$P_Y = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \frac{U_{л}}{\sqrt{3} \cdot z_{\phi}} \cdot \cos \varphi = \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \cdot \cos \varphi; \quad (3.24)$$

$$Q_Y = \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \cdot \sin \varphi; \quad (3.25)$$

$$S_Y = \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}}. \quad (3.26)$$

При з'єднанні фаз навантаження за схемою «трикутник» лінійний струм більше фазного в  $\sqrt{3}$  раз згідно виразу

$$I_{л\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_{л}}{z_{\phi}}. \quad (3.27)$$

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{U_{л}}{z_{\phi}} \cdot \cos \varphi = 3 \cdot \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \cdot \cos \varphi; \quad (3.24)$$

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}} \cdot \sin \varphi; \quad (3.25)$$

$$S_{\Delta} = 3 \cdot \frac{U_{л}^2}{z_{\phi}}. \quad (3.26)$$

Співвідношення між струмами має вигляд та дорівнює

$$\frac{I_{л\Delta}}{I_{лY}} = \frac{\sqrt{3} U_{л}}{z_{\phi}} : \frac{U_{л}}{\sqrt{3} z_{\phi}} = 3. \quad (3.27)$$

Співвідношення між потужностями має вигляд та дорівнює

$$\frac{P_{\Delta}}{P_Y} = \frac{3 \cdot U_{л}^2 \cdot \cos \varphi}{z_{\phi}} : \frac{U_{л}^2 \cdot \cos \varphi}{z_{\phi}} = 3. \quad (3.28)$$

$$\frac{Q_{\Delta}}{Q_Y} = 3; \quad \frac{S_{\Delta}}{S_Y} = 3. \quad (3.29)$$

Таким чином, при переключенні фаз навантаження зі схеми «зірка» на схему «трикутник» лінійні струми і потужності, які споживає навантаження, збільшуються у **три рази**.

### Контрольні запитання до теми 3

1. Поясніть конструкцію трифазного генератора та опишіть його принцип дії.
2. Що таке фаза генератора? Наведіть розрахункову схему фази  $A$  генератора для миттєвих значень.
3. Яка трифазна система є незв'язаною, а яка є зв'язаною?
4. Що таке лінійний провід та нульовий (нейтральний) провід?
5. Яке з'єднання фаз генератора має назву «зірка»? Наведіть розрахункову схему генератора при схемі з'єднанні «зірка».
6. Що таке фазна та лінійна напруга генератора? Яке існує співвідношення між значеннями фазних і лінійних напруг генератора при схемі з'єднанні «зірка»?
7. Який струм є фазний, а який струм є лінійним? Яке існує співвідношення між значеннями фазних і лінійних струмів при схемі з'єднанні «зірка»?
8. Яке з'єднання фаз навантаження має назву «трикутник»? Наведіть розрахункову схему навантаження при схемі з'єднанні «трикутник».
9. Яке існує співвідношення між значеннями фазних і лінійних струмів при схемі з'єднанні «трикутник»?
10. Яке існує співвідношення між значеннями фазних і лінійних напруг при схемі з'єднанні «трикутник»?
11. Як визначити активну, реактивну та повну потужність, яку споживає трифазне навантаження?

### Список літератури для вивчення теми 3

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / В.І.Мілих, О.О.Шавьолкін. За ред. В.І.Мілих. – К.: Каравелла, 2007. – 688 с.
2. Овчаров В.В. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / В.В.Овчаров, О.Ю.Вовк. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.



## Лекція 6

### ТЕМА 4. МАГНІТНІ ПОЛЯ І МАГНІТНІ КОЛА

#### План лекції

- 4.1 Загальні поняття про магнітне поле і магнітні величини
- 4.2 Явище та закон електромагнетизму
- 4.3 Магнітне коло та його конструктивна схема
- 4.4 Магнітні властивості матеріалів

#### 4.1 Загальні поняття про магнітне поле і магнітні величини

Принцип дії багатьох електротехнічних пристроїв – трансформаторів, електричних апаратів і машин, електровимірювальних приладів, побудований на взаємодії електричних струмів і магнітних полів або на взаємодії різних магнітних полів. Для електротехнічних пристроїв необхідне існування двох складових частин – електричного кола та магнітного кола.

**Магнітне коло** – це одне або сукупність феромагнітних осердь, які мають назву *магнітопроводи* і призначені для проведення магнітного поля, його підсилення і концентрації у визначених робочих зонах пристроїв.

Як відомо, стан електричних кіл і процеси в них описуються за допомогою електричних величин: струму, ЕРС та напруги.

Для магнітних полів та магнітних кіл використовують **магнітні величини: магнітна індукція, напруженість магнітного поля, магнітний потік, потікочеплення.**

**Магнітна індукція,  $B$ ,  $Tл$** , є силовою характеристикою магнітного поля, а її вектор у просторі орієнтований по дотичній до силової лінії. За модулем магнітна індукція дорівнює відношенню обертаючого моменту рамки зі струмом, яка розташована в даній точці поля до добутку площі рамки на силу струму в ній згідно виразу

$$B = \frac{M}{I \cdot S}, \quad (4.1)$$

де  $M$  – обертаючий момент,  $H \cdot m$ ;

$I$  – сила струму,  $A$ ;

$S$  – площа рамки,  $m^2$ .

**Напруженість магнітного поля**,  $A/m$  – це магнітна величина, вектор якої орієнтований так само, як і вектор магнітної індукції. Між індукцією і напруженістю магнітного поля існує взаємозв'язок, який описується виразом

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H, \quad (4.2)$$

де  $\mu_0$  – магнітна стала,  $Hn/m$ ;

$\mu_r$  – відносна магнітна проникність.

**Магнітний потік**,  $\Phi$ ,  $Bb$  – це інтегральна величина магнітного поля. Якщо магнітне поле є *однорідним*, а саме, таким, у якого магнітна індукція в будь-якій точці поля однакова, то магнітний потік визначається за виразом

$$\Phi = B \cdot S, \quad (4.3)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік,  $Bb$ ;

$B$  – магнітна індукція,  $Tl$ ;

$S$  – площа поверхні, через яку проходить магнітне поле,  $m^2$ .

**Потокозчеплення**,  $\psi$ ,  $Bb$  – це магнітна величина, яка характеризує зв'язок між магнітним потоком, який створюється котушкою зі струмом та силою електричного струму, згідно виразу

$$\psi = w \cdot \Phi = L \cdot I, \quad (4.4)$$

де  $w$  – кількість витків котушки;

$\Phi$  – магнітний потік,  $Bb$ ;

$L$  – індуктивність котушки,  $Hn$ ;

$I$  – сила електричного струму,  $A$ .

Магнітне поле може створюватися двома основними способами: збудження поля постійними магнітами; електромагнітне збудження поля за допомогою провідників, по яких проходить струм.

## 4.2 Явище та закон електромагнетизму

З курсу фізики відомо, що існує **явище електромагнетизму: навколо провідника зі струмом утворюється магнітне поле**. Магнітне поле розглядають як стан середовища, яке оточує провід з електричним струмом, та яке створюється завдяки руху заряджених часток: електронів або іонів. Напрямок силових ліній магнітного поля визначається за правилом «буравчика» або «правого гвинта»: якщо угвинчувати буравчик (правий гвинт) за напрямом електричного струму, то напрям його обертання буде збігатися з напрямом силових ліній магнітного поля.

Зв'язок між магнітним потоком, що створюється котушкою зі струмом та силою електричного струму встановлює **закон електромагнетизму: потікочеплення, як добуток кількості витків котушки на магнітний потік, прямо пропорційно добутку індуктивності котушки на силу електричного струму згідно виразу (4.4)**.

## 4.3 Магнітне коло та його конструктивна схема

Як було зазначено в пункті 4.1 **магнітне коло** – це сукупність пристроїв, які забезпечують можливість створення магнітного потоку. Магнітне коло містить магнітопровід, який призначений для замикання і підсилення магнітного потоку, а також котушку, яка виконана з проволу та яка призначена для протікання електричного струму і створення магнітного потоку. На рисунку 4.1 наведена конструктивна схема нерозгалуженого магнітного кола.

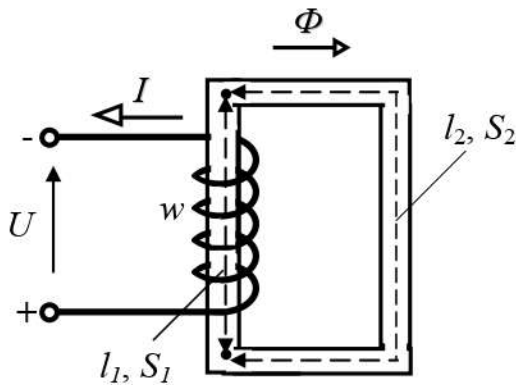


Рисунок 4.1

Котушка живиться від джерела постійного електричного струму.

Магнітопроводи виконуються з феромагнітних матеріалів (залізо, нікель, кобальт, їх сплави) та можуть мати різні довжини і перерізи, а також повітряні прошарки.

Магнітопровід містить дві ділянки: 1-а ділянка довжиною  $l_1$ , перерізом  $S_1$ ; 2-а ділянка довжиною  $l_2$ , перерізом  $S_2$ . Котушка містить кількість витків  $w$ . До котушки підведена напруга  $U$ , під дією якої протікає намагнічуючий струм  $I$ . В результаті буде спостерігатися явище електромагнетизму, а саме, в котушці з намагнічуючим струмом  $I$  створюється магнітний потік  $\Phi$ .

#### 4.4 Магнітні властивості матеріалів

Розглянемо магнітні властивості матеріалів на прикладі однорідного магнітного поля. **Однорідне магнітне поле** – це таке поле, у якого магнітна індукція в будь-якій точці поля однакова. Прикладом такого поля може бути магнітне поле між плоскими полюсами магнітів. Для однорідного магнітного поля діє **закон повного струму: намагнічуюча сила (добуток кількості витків котушки на силу струму) прямо пропорційна добутку напруженості магнітного поля на довжину магнітопроводу згідно виразу**

$$F = w \cdot I = H \cdot l, \quad (4.5)$$

де  $F$  – намагнічуюча сила котушки,  $A$ ;

$w$  – кількість витків котушки;

$I$  – сила струму, який протікає в котушці,  $A$ ;

$H$  – напруженість магнітного поля,  $A/m$ ;

$l$  – довжина магнітопроводу котушки,  $m$ .

З виразу (4.5) залежність напруженості магнітного поля від намагнічуючого струму має вигляд

$$H = \frac{w \cdot I}{l}. \quad (4.6)$$

Якщо по котушці пропускати електричний струм та при цьому змінювати силу електричного струму від нуля до певного значення, то буде змінюватися і магнітна індукція за залежністю

$$B = \mu_c \cdot H. \quad (4.7)$$

Магнітний потік буде змінюватися за законом

$$\Phi = \mu_c \cdot H \cdot S. \quad (4.8)$$

Процеси в магнітних колах і значення магнітних величин суттєво залежать від магнітних властивостей середовища, які, характеризуються абсолютною  $\mu$  та відносною  $\mu_r$  магнітними проникностями. Залежно від значення  $\mu_r$  матеріали поділяють на два основні види: **неферомагнітні** і **феромагнітні**.

Якщо  $\mu_r \approx 1$ , то матеріали мають назву **неферомагнітні**. До таких матеріалів належать повітря, електроізоляційні матеріали, а саме, слюда, скло, папір, пластмаса, смола, поліетилен та деревина.

Якщо  $\mu_r \gg 1$  (може досягати 100...10000), то це **феромагнітні матеріали** або **магнітні**. До таких матеріалів належать залізо, кобальт, нікель, електротехнічні сталі, сплави металів. Феромагнетики поділяють на дві групи: **магнітом'які** матеріали, що використовуються як провідники магнітного потоку, та **магнітотверді** матеріали, що використовуються як джерело магнітного поля.

З курсу фізики відомо, що з ростом магнітного потоку у феромагнетику його магнітна проникність буде зменшуватися, тому то залежність  $\Phi = f(H)$  або  $B = f(H)$  буде нелінійною. Така крива має назву **крива намагнічування** – рисунок 4.2, яка вперше була експериментально встановлена для м'якого заліза російським фізиком **Олександром Григоровичем Столетовим** у 1871 році.

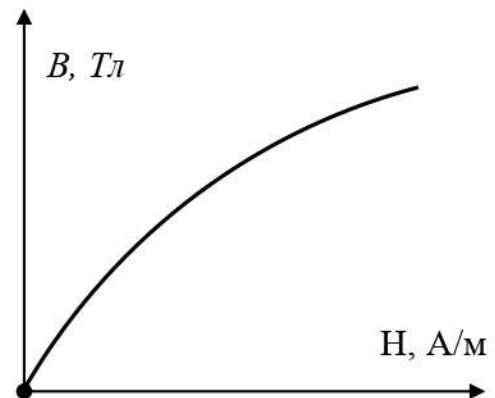


Рисунок 4.2 –

Крива намагнічування

#### Контрольні запитання до теми 4

1. Яка фізична величина є силовою характеристикою магнітного поля?
2. Що таке магнітна індукція? Як аналітично визначається магнітної індукції?
3. Що таке однорідне магнітне поле? Що таке магнітний потік для однорідного магнітного поля? Як аналітично визначається магнітний потік?

4. Сформулюйте закон електромагнетизму та запишіть його математично.
5. Що таке напруженість магнітного поля? Як аналітично визначається напруженість магнітного поля?
6. Що таке магнітне коло? Назвіть основні елементи магнітного кола.
7. Яке призначення магнітопроводу? З яких матеріалів виготовляються магнітопроводи?
8. Сформулюйте закон повного струму для однорідного магнітного поля та запишіть його математично.
9. Що таке намагнічуюча сила? Як аналітично визначається намагнічуюча сила?
10. Що таке крива намагнічування? Зобразіть графічно криву намагнічування та охарактеризуйте її.

#### **Список літератури для вивчення теми 4**

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / В.І.Мілих, О.О.Шавьолкін. За ред. В.І.Мілих. – К.: Каравелла, 2007. – 688 с.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / Будіщев М.С. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
3. Овчаров В.В. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / В.В.Овчаров, О.Ю.Вовк. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.
4. Паначевний Б.І. Загальна електротехніка: теорія і практикум / Б.І. Паначевний, Ю.Ф. Свєргун. – Київ: Каравела, 2003. – 440 с.

## Лекція 7

### ТЕМА 5. ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

#### План лекції

- 5.1 Основні поняття з теорії електричних вимірювань
- 5.2 Класифікація електровимірювальних приладів
- 5.3 Будова та принцип дії електровимірювальних приладів різних систем

#### 5.1 Основні поняття з теорії електричних вимірювань

**Вимірювання** – це процес порівняння дослідним шляхом фізичної величини з прийнятим за її одиницю значенням.

Для вимірювань використовують такі **технічні засоби вимірювань**:

- **міри** – це зразок, який призначений для дійсного відтворення одиниці вимірювання фізичної величини. Найточніша міра – це еталон, який використовується для атестації зразкових мір, а за ними встановлюють **робочі міри** у виробничій і лабораторній метрологічній практиці;
- **вимірювальний прилад** – це пристрій, за допомогою якого виробляється сигнал вимірювальної інформації, у формі яка доступна спостерігачеві;
- **вимірювальний перетворювач** – це засіб, який призначений для перетворення вимірювальної величини в сигнал вимірювальної інформації;

Залежно від способу отримання результату вимірювання усі вимірювання поділяються на чотири види:

- **пряме вимірювання**, при якому значення фізичної величини отримують безпосередньо з вимірювання;
- **непряме вимірювання** – це вимірювання, при якому шукану фізичну величину обчислюють за даними прямих вимірів інших величин, з якими вона зв'язана певною залежністю;
- **сукупні вимірювання** – це вимірювання кількох однойменних фізичних величин шляхом виконання прямих вимірів різних співвідношень цих величин;



- **спільні вимірювання** складаються з прямих вимірів кількох фізичних величин в умовах, що змінюються, і наступного знаходження залежності між цими величинами.

Розрізняють два методи вимірювань: **пряме перетворення і порівняння з мірою**. У першому випадку, вимірювальна величина перетворюється на вимірювальний сигнал, і її значення надходить безпосередньо на відліковий пристрій приладу. В другому випадку вимірювальна величина порівнюється з мірою того ж роду, каліброване значення підбирається до встановлення рівності, що фіксується за показом індикатора – чутливого приладу.

Електричними методами можна виміряти практично усі електричні величини, а також значну кількість неелектричних величин. Ці методи характеризуються високою точністю та чутливістю, широким діапазоном вимірювань, можливістю передачі результатів на великі відстані, швидкодією та порівняно малими габаритами засобів вимірювань. Електричні вимірювання ефективні для автоматичного контролю і керування технологічними процесами, для сигналізації, причому отримана вимірювальна інформація може подаватись до ЕОМ.

## **5.2 Класифікація електровимірювальних приладів**

Електровимірювальні прилади призначені для перетворення різних електричних величин (сили струму, напруги, активних і реактивних потужностей та енергій, коефіцієнта потужності, опору, індуктивності, ємності) у візуальну форму, яка зручна для сприйняття спостерігачем.

Електровимірювальний прилад містить вимірювальний механізм, який розташований у корпусі, та допоміжні частини, а саме, затискачі для підключення, перемикачі границь вимірювань, пристрій відліку, коректор, аретир та заспокоювач. Вимірювальний механізм містить рухому і нерухому частини та має шкалу з певною кількістю поділок.

За родом вимірювальної величини прилади поділяються на: вольтметри, амперметри, омметри, ватметри, варметри, лічильники електроенергії, фазоме-



три, частотоміри. Існують комбіновані прилади, які призначені для вимірювання різних величин.

За видом отриманої вимірювальної інформації розрізняють прилади, що показують, реєструють, друкують, інтегрують, а також самописні і такі, що підсумовують. Прилади поділяються на *аналогові* та *цифрові*. В *аналогових приладах* результат вимірювання має вигляд неперервної функції вимірювальної величини, а в *цифрових приладах* автоматично виробляються дискретні сигнали (з деяким часовим інтервалом) і результати надаються в цифровій формі.

За принципом дії і конструктивною реалізацією прилади можуть бути *електромеханічними* або *електронними*. У перших використовуються елементи, що електромеханічно взаємодіють та переміщуються (обертаються). У других основними функціональними елементами є електронні блоки і вузли.

Вибір електровимірювального приладу здійснюється за такими критеріями:

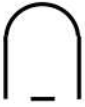
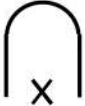

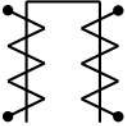
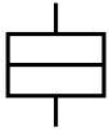
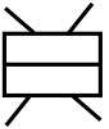


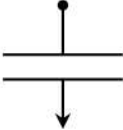
- за видом вимірюваною фізичної величини;
- за родом струму;
- за класом точності;
- за системою приладу;
- за границею вимірювання приладу.

В таблиці 5.1 наведені основні умовні позначення на шкалах аналогових приладів.

### **5.3 Будова та принцип дії електровимірювальних приладів різних систем**

Залежно від принципу дії вимірювального механізму, а саме, від принципу перетворення електромагнітної енергії вимірювального сигналу в механічну енергію рухомої частини і виду функції перетворення, електромеханічні аналогові вимірювальні прилади поділяються на такі *системи*: *магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, феродинамічну, електростатичну та індукційну*.

Таблиця 5.1 - Основні умовні позначення на шкалах аналогових приладів

Назва	Умовне позначення
<b>1.Позначення системи вимірювального механізму приладу:</b>	
- магнітоелектричний механізм звичайний	
- магнітоелектричний механізм логометричний	
- електромагнітний механізм звичайний	
- електромагнітний механізм логометричний	
- електродинамічний механізм звичайний	
- електродинамічний механізм логометричний	
- феродинамічний механізм звичайний	
- феродинамічний механізм логометричний	
- електростатичний механізм	





Продовження таблиці 5.1

Назва	Умовне позначення
- індукційний механізм	
<b>2. Позначення роду струму:</b>	
- постійний струм	
- змінний однофазний струм	
- постійний і змінний струм	
- трифазний змінний струм	
- трифазний змінний струм з асиметричним навантаженням	
<b>3. Позначення нормального положення шкали приладу:</b>	
- горизонтальне	
- вертикальне	
- установка шкали приладу під кутом (45...60...75°)	
<b>4. Екранування та захист:</b>	
- електростатичний екран	
- магнітний екран	
- захист від зовнішній магнітних полів	
- захист від зовнішній електричних полів	

Продовження таблиці 5.1

Назва	Умовне позначення
<b>5. Позначення класу точності:</b>	
- клас точності, який виражений у формі зведеної похибки	<b>0,5</b>
- клас точності, який виражений у формі відносної похибки	
- клас точності, який виражений у формі зведеної похибки (у відсотках від довжини шкали)	
- клас точності, який виражений у формі зведеної похибки (у відсотках від інтервалу вимірювань)	
<b>6. Міцність ізоляції вимірювального кола приладу:</b>	
- вимірювальне коло приладу ізольоване від корпусу і випробуване під напругою 2,0 кВ	
- вимірювальне коло приладу ізольоване від корпусу і випробуване під напругою 0,5 кВ	
- прилад випробуванню ізоляції не підлягає	
<b>7. Прилади з перетворювачами струму:</b>	
- магнітоелектричний прилад з випрямлячем	
<b>8. Додаткові елементи вимірювального кола:</b>	
- шунт	
- додатковий резистор	
- додаткова індуктивність	

Продовження таблиці 5.1

Назва	Умовне позначення
- затискач для заземлення	
<b>9. Умови експлуатації приладу:</b>	
- робота в сухих приміщеннях, що обігріваються	<b>A</b>
- робота в закритих приміщеннях при температурі повітря від мінус 20 °С до плюс 50 °С та при вологості до 80 %	<b>B</b>
- робота в закритих приміщеннях при температурі повітря від мінус 40 °С до плюс 60 °С та при вологості до 98 %, морські та польові умови	<b>B</b>
- робота в сухому і вологому тропічному кліматі	<b>T</b>
<b>10. Частотний діапазон:</b>	
- розширений діапазон частоти струму	<b><u>35 – 55</u> – 1500 Hz</b>
- нормальний діапазон частоти струму	<b><u>35 – 55</u></b>
- робочий діапазон частоти струму	<b>35 - 1500 Hz</b>
Орієнтація приладу в земному магнітному полі	
Обережно! Міцність ізоляції вимірювального кола не відповідає нормам!	
Увага! Прилад без інструкції не вмикати	

Вимірювальний механізм приладу *магнітоелектричної системи* містить постійний магніт, який має підковоподібну форму. Усередині магніту знаходиться котушка індуктивності, зв'язана зі стрілкою приладу. При протіканні електричного струму в провідниках котушки спостерігається явище електромагнітної сили. В результаті котушка, яка закріплена на осі, повертається на кут,

пропорційний значенню вимірюваної величини. Разом з котушкою відхиляється стрілка приладу, вказуючи на шкалі значення вимірюваної величини. Прилади цієї системи використовуються для вимірювань у колах постійного струму.

Вимірювальний механізм приладу *електромагнітної системи* містить котушку індуктивності з рухомим магнітопроводом, який зв'язаний зі стрілкою приладу. При протіканні електричного струму в провідниках котушки спостерігається явище електромагнетизму. В результаті магнітопровід втягується в котушку пропорційно значенню вимірюваної величини, а стрілка приладу відхиляється на кут, пропорційний значенню вимірюваної величини. Прилади цієї системи використовуються для вимірювань у колах постійного та змінного струмів.

Вимірювальний механізм приладу *електродинамічної системи* містить дві котушки індуктивності: рухому та нерухому. При протіканні електричного струму в провідниках котушок спостерігається явище електромагнітної сили. В результаті рухома котушка, яка знаходиться усередині нерухомої котушки, відхиляється на кут, пропорційний значенню вимірюваної величини, при цьому відхиляється стрілка кут, пропорційний значенню вимірюваної величини. Такі прилади використовуються для вимірювань у колах постійного та змінного струмів.

Вимірювальний механізм приладу *індукційної системи* містить дві нерухомі котушки індуктивності, які зсунуті у просторі на кут  $90^\circ$  одна до одної, та обертальну алюмінієву частину – диск, який розміщується між котушками. Одну котушку включають паралельно мережі, а іншу – послідовно до навантаження. Струми у котушках, створюють два магнітних потоки, які пронизують диск і наводять у ньому вихрові електрорушійні сили, під дією яких диск будуть пронизувати вихрові струми, отже, диск знаходиться в магнітному полі двох нерухомих котушок. В результаті дії електромагнітної сили диск починає обертатися.

У приладах *електростатичної системи* принцип дії вимірювального механізму засновано на взаємодії заряджених тіл – провідників – відповідно до

закону Кулона. Такий механізм виконаний як конденсатор змінної ємності, яка повільно змінюється при повороті рухомої частини.

Електровимірювальні прилади мають такі метрологічні характеристики:

- **границя вимірювання** – це найбільше значення фізичної величини, яке можна вимірити приладом;
- **постійна приладу** – це кількість одиниць вимірюваної фізичної величини в одній поділці шкали приладу, яка визначається за виразом

$$C = \frac{A_K}{N_{MAX}}, \quad (5.1)$$

де  $C$  – постійна приладу;

$A_K$  – границя вимірювання приладу;

$N_{MAX}$  – кількість поділок на шкалі приладу;

- **чутливість приладу** – це кількість поділок шкали, на яку відхиляється стрілка приладу при зміні вимірюваної фізичної величини на одну одиницю

$$S = \frac{N_{MAX}}{A_K} = \frac{1}{C}; \quad (5.2)$$

Вимірне значення величини за показання приладу визначається як добуток постійної приладу на кількість поділок  $N_i$ , на яку відхилилася стрілка приладу при вимірюванні

$$A_{вим} = C \cdot N_i, \quad (5.3)$$

## Лекція 8

### ТЕМА 5. ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

#### План лекції

- 5.4 Похибки процесу вимірювання та електровимірювальних приладів
- 5.5 Вимірювання струму, напруги, потужностей та коефіцієнту потужності
- 5.6 Вимірювання електричного опору
- 5.7 Вимірювання електричної енергії

#### **5.4 Похибки процесу вимірювання та електровимірювальних приладів**

Під час вимірювань показання приладів завжди відрізняються від дійсних значень вимірюваної величини, тому то виникають **похибки**, тобто відхилення результату виміру від дійсного значення вимірюваної величини, які обумовлюються, з одного боку, мінливістю параметрів елементів вимірювального приладу, недосконалістю вимірювального механізму (наприклад, наявністю тертя), впливом зовнішніх факторів (наявністю магнітних і електричних полів), зміною температури навколишнього середовища, а з іншого сторони, недосконалістю органів почуттів людини й іншими випадковими факторами. В метрологічній практиці за **дійсне** значення фізичної величини приймається значення, яке виміряне за допомогою еталонних (зразкових) приладів.

Похибки характеризують ступінь точності приладів і процесу вимірювання. Похибки класифікують за:

- за способом виразу похибки приладів та методів вимірювань – **абсолютні, відносні, приведені**;
- за характером прояву – **систематичні, випадкові, похибки оператора**;
- за умовами експлуатації – **основні та додаткові**.

**Систематична похибка** зумовлена чинниками, які можна врахувати за допомогою поправок. Ця похибка залежить від недосконалості приладу, від впливу зовнішніх умов, від загальної недосконалості вимірювань.



**Випадкова похибка** виникає внаслідок окремих випадкових чинників, що не підлягають безпосередньому врахуванню. Її не можна визначити дослідним шляхом. Оцінку випадкових похибок можна зробити методом теорії ймовірності при великій кількості повторюваних вимірювань.

**Похибка оператора** виникає через помилковий запис, неправильне визначення постійної приладу. Ця похибка значно відрізняє загальні результати вимірювань. Ці результати експериментатор виключає при обробці результатів.

**Основною похибкою** вважають похибку приладів за нормальних умов експлуатації відповідно до даних, наведених у паспорті приладу або на шкалі.

**Додатковою похибкою** є похибка приладу, що виникає при відхиленні від нормальних кліматичних умов, при цьому робочими кліматичними умовами вважають дійсні параметри навколишнього середовища, при яких працює прилад.

Різниця між показанням приладу  $A_{вим}$  і дійсним значенням вимірюваної величини  $A_{д}$ , виражена в одиницях вимірюваної величини, має назву **абсолютна похибка**, яка аналітично визначається за виразом

$$\Delta A = A_{вим} - A_{д}. \quad (5.4)$$

Величина, яка зворотна за знаком абсолютній похибці, має назву **поправка до показань приладу**, та дорівнює

$$поправка = -\Delta A. \quad (5.5)$$

Для оцінки точності процесу вимірювання для одного показання приладу призначена **відносна похибка**, яка є відношенням абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини, виражене звичайно у відсотках

$$\delta = \frac{\Delta A}{A_{д}} \cdot 100\%. \quad (5.6)$$

Точність вимірювальних приладів оцінюють за величиною **приведеної похибки**, яка визначається як відношення абсолютної похибки приладу до границі вимірювання, виражене у відсотках

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_k} \cdot 100\% . \quad (5.7)$$

За величиною приведеної похибки визначається **клас точності приладу**. Так, електровимірювальні прилади поділяються на вісім класів: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0, причому цифра, що позначає **клас точності, вказує на найбільше припустиме значення приведеної похибки приладу** (у відсотках). Клас точності вказується на шкалі кожного вимірювального приладу.

Вимірювальні прилади, що виготовляються на приладобудівних заводах, підлягають ремонту, ввозяться з-за кордону та знаходяться в експлуатації та на зберіганні, підлягають метрологічній повірці.

**Метрологічна повірка приладу** – це визначення похибок приладів та встановлення їх придатності для застосування за призначенням. Існують такі види повірок, як первинна, періодична, позачергова, експертна та інспекційна.

**Первинна повірка** здійснюється при випуску приладу з виробництва або після ремонту та при ввезенні їх з-за кордону партіями. Первинній повірці підлягає кожен екземпляр вимірювальної техніки.

**Періодична повірка** здійснюється для приладів, що знаходяться в експлуатації або на зберіганні, через певні між перевірочні інтервали.

**Позачергова повірка** здійснюється для приладів, що знаходяться в експлуатації або на зберіганні, і вона виконується в таких випадках: при необхідності переконання у придатності приладу до застосування; при пошкодженні пломби, клейма або втрат документів, що засвідчують проходження приладу первинної або періодичної повірок; при введенні в експлуатацію приладу після зберігання, упродовж якого не була проведена періодична повірка.

**Експертна повірка** виконується, якщо виникли суперечливі питання стосовно метрологічних характеристик, придатності та правильності використання приладу. Така повірка здійснюється органами державної метрологічної служби на основі письмових вимог суду, прокуратури, поліції та державного арбітражу.

**Інспекційна повірка** проводиться під час державного метрологічного нагляду з метою перевірки придатності приладу до застосування.

Повірку ЗВТ можуть виконувати тільки органи метрологічної служби, що мають на це дозвіл. До проведення повірки допускаються особи, які пройшли спеціальне навчання і склали іспити у навчальних закладах Державної метрологічної служби України. Результати повірки оформлюються протоколом, до якого вносять формальні дані (назва, тип, завод-виробник, рік випуску та номер) і фактичні характеристики приладу, а також умови виконання повірки (температура, тиск, вологість), результати вимірювань під час повірки, висновки про придатність чи непридатність засобу вимірювань для застосування за призначенням. Прилади, які не задовольняють вимогам технічних умов, визнаються не придатними для використання.

### 5.5 Вимірювання струму, напруги, потужностей та коефіцієнту потужності

Для вимірювання сили струму у колах призначений **амперметр**, літерне позначення якого на принципових електричних схемах – *A*. Він підключається послідовно до кола, у якому виконується вимірювання – рисунок 5.1. Опір котушки вимірювального механізму амперметра повинний бути мінімальним, щоб сила струму в колі не змінилася при підключенні амперметра до кола.

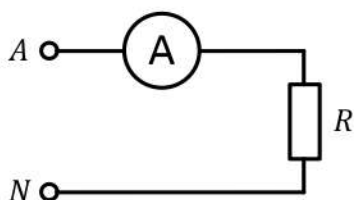


Рисунок 5.1 – Схема підключення амперметра до кола

З цією метою котушку виконують з невеликою кількістю витків із проводу з великим перетином. Амперметр обирається для вимірювань у такий спосіб: границя вимірювання приладу повинна перевищувати передбачуване значення сили струму в колі. Для розширення границі вимірювання амперметра використовують вимірювальні трансформатори струму або шунти, які за конструкцією є манганіновими пластинами, до яких припаяні мідні чи латунні наконечники. Шунт підключається до кола послідовно, а паралельно йому підключається амперметр.

Для вимірювання напруги у колах призначений **вольтметр**, літерне позначення якого на принципових електричних схемах – *V*. Він підключається па-

ралельно до навантаження – рисунок 5.2. Опір котушки вимірювального механізму вольтметра повинний бути максимальним, щоб напруга в колі не змінилася при підключенні вольтметра. З цією метою котушку виконують з великою кількістю витків із проводу з невеликим перетином.

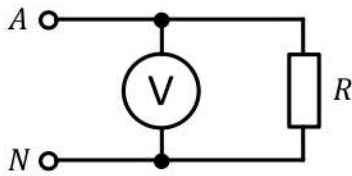


Рисунок 5.2 – Схема підключення вольтметра до кола

Вольтметр обирається для вимірювань у такий спосіб: границя вимірювання приладу повинна перевищувати передбачуване значення напруги в колі. Для розширення границі вимірювання вольтметра використовують вимірювальні трансформатори

напруги або додаткові опори, які включаються послідовно з вольтметром.

Для вимірювання активної потужності у колах призначений **ватметр**, літерне позначення якого на принципових електричних схемах – *W*. Вимірювальний механізм ватметра містить дві котушки: нерухому та рухому, зв'язаної зі стрілкою приладу. Нерухома котушка (струмова обмотка) має невелику кількість витків, виконана з проводу із великим перетином, підключається до кола послідовно. Рухома котушка (обмотка напруги) має велику кількість витків, виконана з проводу із невеликим перетином, підключається до кола паралельно. Струми в котушках повинні протікати в одному напрямку, щоб стрілка приладу відхилялася вправо від нуля, для цього затиски приладу зі знаком «\*» поєднуються у загальний вузол.

Ватметр має дві границі вимірювання: за струмом і за напругою, тому постійна ватметра визначаються за виразом

$$C_P = \frac{P_K}{N_{MAX}} = \frac{U_K \cdot I_K}{N_{MAX}} \quad (5.8)$$

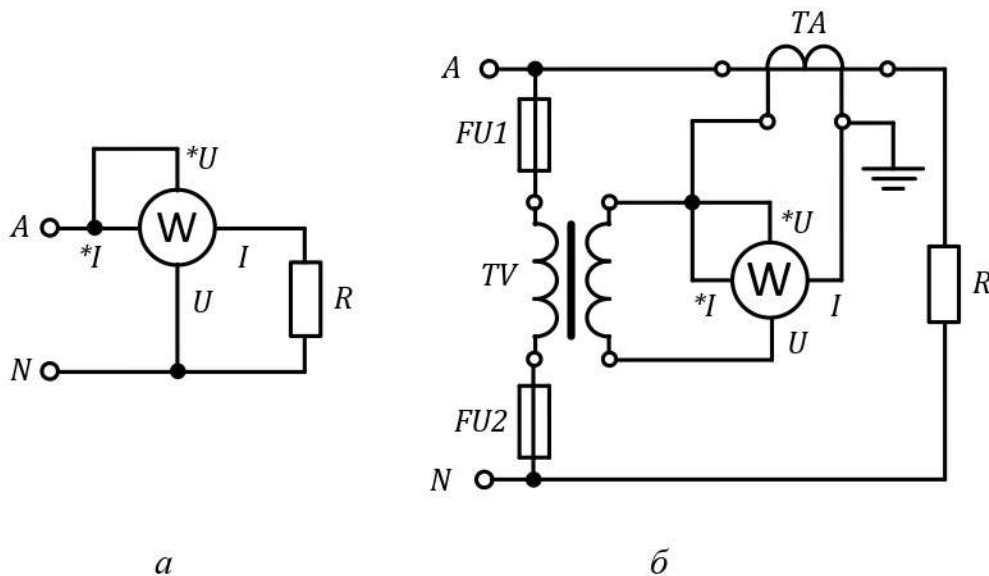
де  $I_K$  – границя вимірювання ватметра за струмом, *A*;

$U_K$  – границя вимірювання ватметра за напругою, *B*.

Вибір ватметра для вимірювань здійснюється за границею вимірювання активної потужності, так границя вимірювання за струмом повинна перевищу-

вати передбачуване значення сили струму в колі, а границя вимірювання за напругою повинна перевищувати передбачуване значення напруги в колі. Для розширення границь вимірювання ватметра використовують вимірювальні трансформатори струму і напруги, рідко - шунти і додаткові опори.

Принципова електрична схема включення ватметра для вимірювання активної потужності, яку споживає навантаження в однофазному колі змінного струму, показана на рисунку 5.3.



*a* – схема безпосереднього підключення ватметра до кола;

*б* – схема підключення ватметра до кола через вимірювальні трансформатори струму *TA* та напруги *TV*

Рисунок 5.3 – Схема підключення ватметра до кола

Реактивна потужність у трифазних колах синусоїдного струму вимірюється трифазними **варметрами** та **непрямими методами** за допомогою однофазних ватметрів, які включені за спеціальними схемами.

Так, при симетричному навантаженні в трифазних електричних колах синусоїдного кола реактивну потужність можна вимірювати одним ватметром, що вмикається за схемою, що наведена на рисунку 5.4.

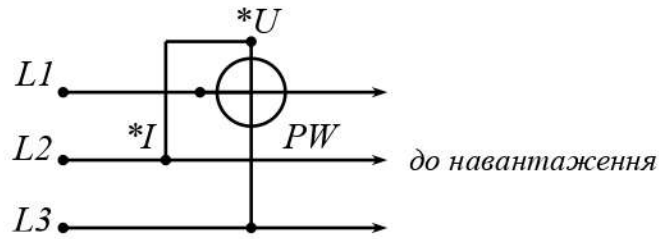


Рисунок 5.4 – Схема включення ватметра до трифазного кола для вимірювання реактивної потужності

Для визначення реактивної потужності усього трифазного кола показання ватметра треба помножити на  $\sqrt{3}$ .

Активна потужність трифазного кола, залежно від схеми з'єднання і характеру навантаження (симетрія або несиметрія), може бути виміряна безпосередньо одним, двома та трьома однофазними ватметрами або одним трифазним ватметром.

Універсальною є схема з двома ватметрами – рисунок 5.5, яка широко застосовується для вимірювання активної та реактивної потужності в трифазних три провідних колах при схемах з'єднання «зірка» або «трикутник» без нейтрального проводу, як при симетричному, так й при несиметричному характері навантаження.

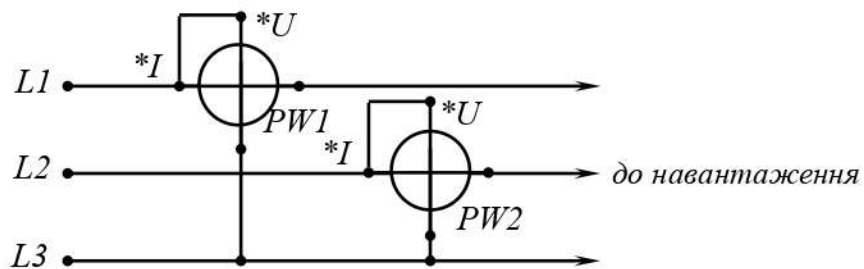


Рисунок 5.5 - Схема для вимірювання активної, реактивної потужності та коефіцієнту потужності з двома ватметрами

Для визначення активної потужності усього трифазного кола за схемою (див. рисунок 5.5) необхідно скористатися аналітичною формулою

$$P_{\text{кола}} = P_{PW1} + P_{PW2}, \quad (5.9)$$

де  $P_{PW1}$ ,  $P_{PW2}$  – показання першого та другого ватметрів відповідно, Вт.

Для визначення реактивної потужності усього трифазного кола за схемою (див. рисунок 5.5) необхідно скористатися аналітичною формулою

$$Q_{\text{кола}} = \sqrt{3}(P_{PW2} - P_{PW1}). \quad (5.10)$$

Для визначення коефіцієнту потужності усього трифазного кола за схемою (див. рисунок 5.5) необхідно скористатися аналітичною формулою

$$\cos \varphi_{\text{кола}} = \frac{P_{PW1} + P_{PW2}}{2 \cdot \sqrt{P_{PW1}^2 - P_{PW1} \cdot P_{PW2} + P_{PW2}^2}}. \quad (5.11)$$

Коефіцієнт потужності у однофазних колах змінного струму можна вимірювати фазометрами та визначити розрахунковим методом за показаннями амперметра, вольтметра та ватметра згідно виразу

$$\cos \varphi_{\text{кола}} = \frac{P_{PW}}{U_{PV} \cdot I_{PA}}, \quad (5.12)$$

де  $P_{PW}$  – показання ватметра,  $Вт$ ;

$I_{PA}$  – показання амперметра,  $А$ ;

$U_{PV}$  – показання вольтметра,  $В$ .

## 5.6 Вимірювання електричного опору

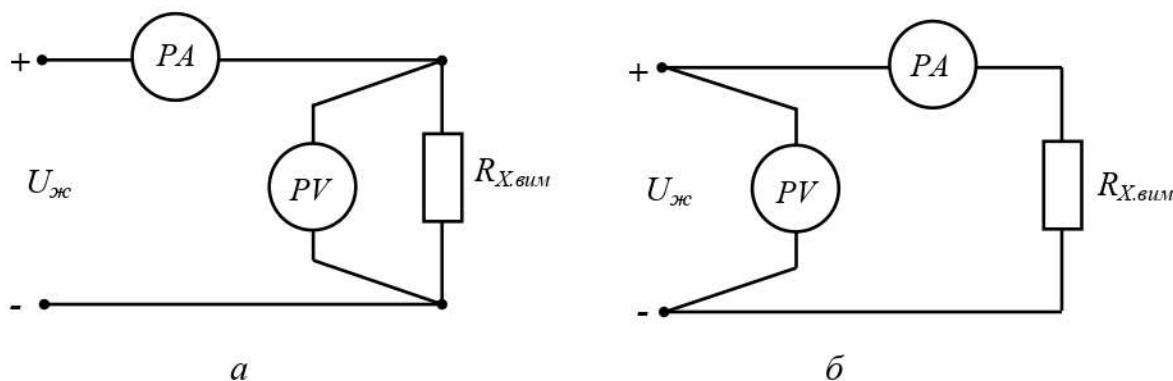
Опір будь-якого об'єкту електричного кола постійного струму можна визначати розрахунковим методом за показаннями амперметра та вольтметра. Існують дві схеми вмикання цих приладів, що наведені на рисунку 5.6. Теорія електричних вимірювань показує, що для отримання більш точних результатів при вимірюванні середніх (від  $1 \text{ Ом}$  до  $10000 \text{ Ом}$ ) і великих (від  $10000$  до  $100000 \text{ Ом}$ ) опорів слід застосовувати схему за рисунком 5.6.а, а при вимірюванні невеликих (менше  $1 \text{ Ом}$ ) опорів – схему за рисунком 5.6.б.

Виміряне за схемою (див. рисунок 5.6.а) значення опору дорівнює

$$R_{X.\text{вим}} = \frac{U_{PV}}{I_{PA}} - R_{PA}, \quad (5.13)$$

де  $R_{PA}$  – внутрішній опір амперметра,  $Ом$ .





*a* – для середніх та великих опорів; *б* – для невеликих опорів

Рисунок 5.6 - Схема вимірювання електричного опору методом амперметра і вольтметра

Виміряне за схемою (див. рисунок 5.6.б) значення опору дорівнює

$$R_{X.вим} = \frac{U_{PV}}{I_{PA} + \frac{U_{PV}}{R_{PV}}} \quad (5.14)$$

де  $R_{PV}$  – внутрішній опір вольтметра, Ом.

Для безпосереднього і швидкого визначення опору застосовують *омметр*, який за конструкцією є магнітоелектричний міліамперметр  $PA$ . Послідовно з вимірювальною котушкою, опір якої  $R_{PA}$ , вмикається додатковий резистор з опором  $R_D$  і джерело живлення (батарея гальванічних елементів) з е.р.с.  $E$  і внутрішнім опором  $R_0$ . При незмінності е.р.с.  $E$  струм у колі дорівнює

$$I_{вим} = \frac{E}{(R_A + R_D + R_0) + R_X}$$

Відповідно показання приладу залежать тільки від величини  $R_X$ , що й дає змогу від градуювати шкалу приладу безпосередньо в одиницях вимірювання опору – Ом.

Для більш точного вимірювання опорів застосовують мостові схеми, найпростіша схема моста постійного струму наведена на рисунку 5.7.



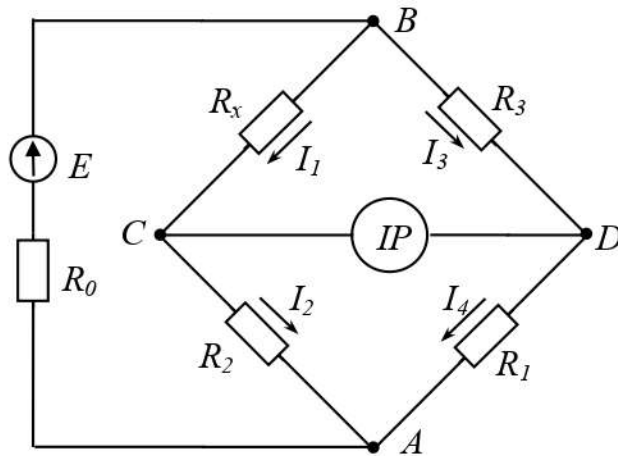


Рисунок 5.7 – Мостова вимірювальна схема

У три плеча моста увімкнуті резистори з опорами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , а у четверте плече – об’єкт з опором  $R_x$ , який вимірюється. До вузлів А і В приєднано джерело живлення з е.р.с.  $E$ , між вузлами С і D увімкнено надзвичайно чутливим магнітоелектричний прилад, який показує величину напругу  $U_{CD}$ , яка повинна в момент рівноваги моста дорівнювати 0. Рівноваги моста можна добитися зміною опорів  $R_1$ ,  $R_2$ , та  $R_3$ , струм при такому стані моста в діагоналі CD дорівнює 0.

Умова рівноваги моста має вигляд

$$R_1 \cdot R_x = R_2 \cdot R_4; \quad (5.15)$$

звідки можна визначити величину  $R_x$

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1}. \quad (5.16)$$

Для вимірювання великих опорів призначений *мегомметр*, який відрізняється від омметра тим, що за джерело живлення використовується магнітоелектричний генератор, який приводиться в дію ручним способом. Е.р.с. генератора сягає досить високих значень (500...2000 В), завдяки чому мегомметром можна вимірювати дуже великі опори.

## 5.7 Вимірювання електричної енергії

Електрична енергія, яка спожита споживачем за проміжок часу  $t = t_2 - t_1$ , дорівнює

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt, \quad (5.17)$$

де  $P$  – потужність, яку споживає об'єкт.

Прилад, який призначений для вимірювання електричної енергії, повинен бути *інтегровальним* за принципом дії та реагувати на величину *потужності* споживача і мати *лічильний пристрій обліку*. Для вимірювань витрат енергії у колах змінного струму для промислових та побутових потреб застосовують **лічильники** електричної енергії, у вимірювальній частині яких використовують вимірювальний механізм індукційної системи або електронний інтегратор.

За принципом дії лічильники поділяються на дві основні групи: **електромеханічні лічильники** з індукційним вимірювальним механізмом та **електронні лічильники** з цифровим відліком. В промисловості та в побуті найпоширенішими відповідно є трифазні лічильники активної енергії та однофазні лічильники активної енергії.

Лічильники електричної енергії до однофазних кіл підключають до споживача безпосередньо або з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги. На рисунку 5.8 наведена схема безпосереднього під'єднання однофазного індукційного лічильника до споживача, на якій літерами  $\Gamma$  позначені генераторні клеми лічильника, а літерами  $H$  – клеми підключення навантаження. Дійсна витрата активної електричної енергії  $\Delta W$  за поточний період визначається за формулою

$$\Delta W = W_{\text{кінець}} - W_{\text{початок}} \quad (5.18)$$

де  $W_{\text{кінець}}$ ,  $W_{\text{початок}}$  – показання лічильника наприкінці та на початку поточного періоду відповідно, *кВт·год*.

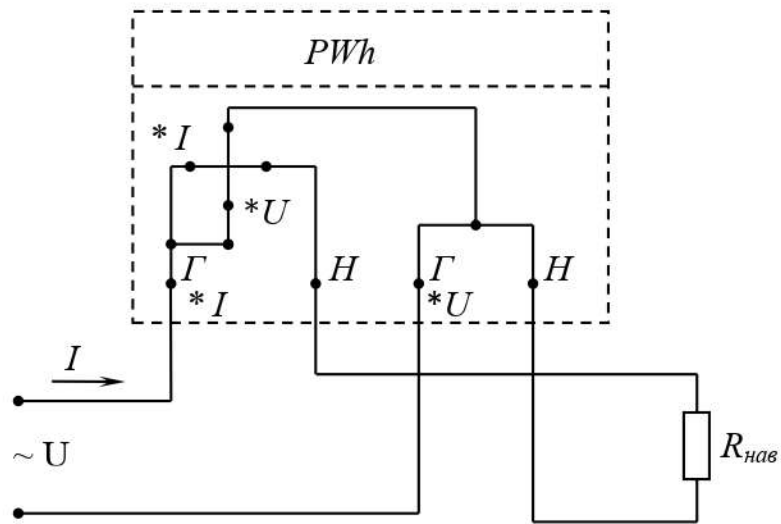


Рисунок 5.8 - Схема безпосереднього під'єднання однофазного індукційного лічильника до споживача

На рисунку 5.9 наведена схема під'єднання однофазного індукційного лічильника до споживача через вимірювальні трансформатори струму та напруги.

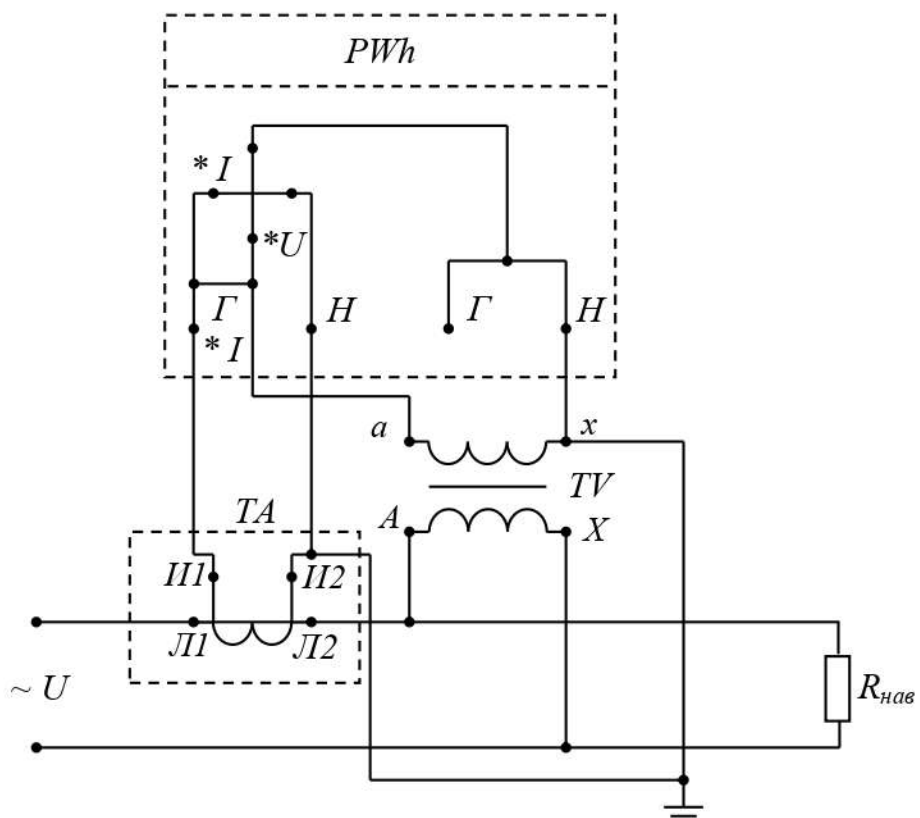


Рисунок 3.2 - Схема під'єднання однофазного індукційного лічильника до споживача через вимірювальні трансформатори струму та напруги

Дійсна витрата активної електричної енергії  $\Delta W$  за поточний період визначається за формулою

$$\Delta W = k_{IH} \cdot k_{UH} \cdot (W_{\text{кінц}} - W_{\text{почат}}), \quad (5.19)$$

де  $W_{\text{кінц}}$ ,  $W_{\text{почат}}$  – показання наприкінці та на початку поточного періоду відповідно,  $\text{кВт}\cdot\text{год}$ .

Одним із недоліків індукційних лічильників електричної енергії є невисока точність та вузький частотний діапазон (45...60 Гц). Значно вищу точність мають електронні лічильники, в яких застосовують електронний інтегратор та спеціальні електронні вузли, які необхідні для одержання сигналу, пропорційного до спожитої енергії, з подальшим аналого-цифровим його перетворенням і цифровим відліком результату вимірювання. В електронних лічильниках вихідний сигнал у цифровому коді можна використовувати у схемах автоматизованого обліку електроенергії.

Електронні лічильники використовують для вимірювання активної та реактивної потужностей в однофазних та трифазних колах змінного струму, а також для вимірювання, обліку активної та реактивної енергії при двох напрямках і при різних тарифах, для вимірювання частоти мережі, для вимірювання напруги та струму споживача, для вимірювання поточного часу при фіксованій календарній даті з наданням поточного тарифу на електричну енергію. Електронні лічильники зберігають інформацію про загальну кількість спожитої електроенергії, про спожиту електроенергію за поточні і попередні роки та місяці. Основними блоками типового електронного лічильника є первинний перетворювач потужності на напругу (ППН), перетворювач напруги на частоту (ПНЧ), інтегрувальний пристрій (ІП) на базі мікроконтролера та цифровий відліковий пристрій (дисплей), а також інфрачервоний порт, електронна пломба та блок автоматичної самодіагностики з індикацією помилок. На вхідні кола напруги та струму перетворювача потужності роздільно подається напруга споживача та струм. Вихідний код інтегрувального пристрою пропорційний до спожитої енергії за відповідний проміжок часу. Результати вимірювання енергії надаються

цифровим відліковим пристроєм, а також надходять в систему автоматизованого контролю і обліку електроенергії (АСКОЕ).

### **Контрольні запитання до теми 5**

1. Що таке метрологія та вимірювання?
2. Що таке вимірювальний прилад та вимірювальний перетворювач?
3. Які існують методи та види вимірювань?
4. Яке призначення умовних позначень на шкалах вимірювальних приладів? Наведіть приклади умовних позначень.
5. Які характеристики приладів є метрологічними? Поясніть кожен метрологічну характеристику.
6. Які існують системи вимірювальних приладів?
7. Опишіть конструкцію та принцип дії приладу магнітоелектричної системи.
8. Опишіть конструкцію та принцип дії приладу електромагнітної системи.
9. Опишіть конструкцію та принцип дії приладу електродинамічної системи.
10. Опишіть конструкцію та принцип дії приладу електростатичної системи.
11. Опишіть конструкцію та принцип дії приладу індукційної системи.
12. Що таке похибка вимірювального приладу та процесу вимірювання?
13. Які існують види похибок? Поясніть означення кожної похибки.
14. Що таке метрологічна повірка? Які існують види повірок? Поясніть означення кожного виду повірки.
15. Поясніть призначення амперметра, вольтметра, ватметра, омметра, електронного лічильника, фазометра, варметра, вимірювального моста.
16. Наведіть схеми вимірювання сили струму та напруги у колах.
17. Наведіть схеми вимірювання активної та реактивної потужності у колах.
18. Наведіть схеми вимірювання електричного опору.
19. Наведіть схеми вимірювання електричної енергії.
20. Розробіть схему електричну принципову одночасного вимірювання електричних величин в однофазному колі змінного струму.

## Список літератури для вивчення теми 5

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / В.І.Мілих, О.О.Шавьолкін. За ред. В.І.Мілих. – К.: Каравелла, 2007. – 688 с.
2. Нестерчук Д.М. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.
3. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. - 172 с.
4. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / Будіщев М.С. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
5. Овчаров В.В. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / В.В.Овчаров, О.Ю.Вовк. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.

## Лекція 9

### ТЕМА 6. ТРАНСФОРМАТОРИ. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

#### План лекції

- 6.1 Однофазний трансформатор
- 6.2 Трифазний силовий трансформатор
- 6.3 Вимірювальні трансформатори напруги та струму

#### 6.1 Однофазний трансформатор

**Трансформатор** – це статичний електромагнітний пристрій, призначений для перетворення змінних напруги та струму за величиною без зміни їхньої частоти.

За призначенням і конструкцією трансформатори різноманітні, але фізичні процеси і принцип дії є однаковими, тому їх вивчають на прикладі однофазного трансформатора. Однофазний трансформатор містить первинну та вторинну багатовиткові котушки із мідного ізольованого проводу, шихтований магнітопровід із тонколистової електротехнічної сталі. Котушки мають назву **обмотки**. Будова однофазного трансформатора наведена на рисунку 6.1.

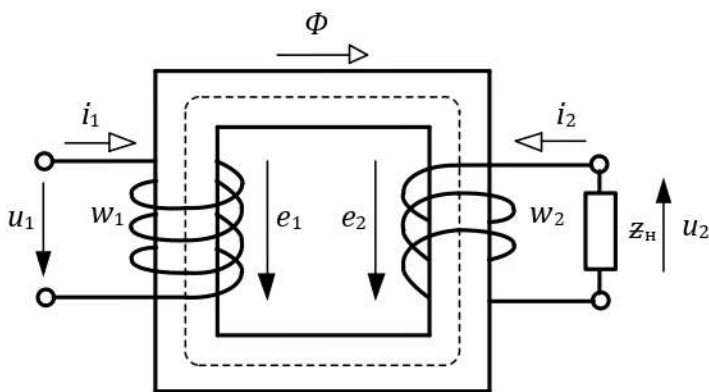


Рисунок 6.1 – Будова трансформатора

**Первинна обмотка трансформатора** – це обмотка, яка підключається до джерела живлення.

**Вторинна обмотка трансформатора** – це обмотка, до якої підключаються споживачі електроенергії або лінії електропередачі, які ведуть до споживачів.

Частини магнітопроводу, на яких розміщуються обмотки, має назву **стрижні**, а частини, що замикають стрижні, має назву **яро**. Магнітопроводи трансформаторів виконуються двох видів: стрижневі та броньові. У стрижне-

вому однофазному трансформаторі первинна і вторинна обмотки розміщуються на двох стрижнях, зв'язаних ярмами. В однофазному броньовому трансформаторі первинна і вторинна обмотки розміщуються на одному стрижні, а магнітопровід охоплює обмотки з двох сторін (як би «бронюючи» їх). Трансформатор, який має одну первинну та одну вторинну обмотки, має назву **двохобмотковий**. Трансформатор, який має одну первинну та дві вторинні обмотки – **триобмотковий**, є також **багатообмоткові** трансформатори. Крім активних частин (магнітопроводу та обмоток) конструкція трансформатора містить у собі ряд частин, призначених для ізоляції, охолодження, кріплення активних частин та інших цілей: корпус або бак із трансформаторним маслом, вводи, ізоляція обмоток і магнітопроводу. Обмотки відрізняються кількістю витків. Обмотка з більшою кількістю витків – це обмотка вищої напруги (ВН), з меншою кількістю витків – це обмотка нижчої напруги (НН).

**Принцип дії** однофазного трансформатора наступний: до первинної обмотки підводиться змінна напруга  $u_1$ , в результаті чого в обмотці протікає змінний струм  $i_1$ . Цей струм створює змінний магнітний потік  $\Phi_1$ , який замикається по магнітопроводу та пронизує витки первинної і вторинної обмоток. В результаті в цих обмотках наводяться змінні е.р.с.  $e_1$  і  $e_2$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6.1)$$

де  $w_1$  – кількість витків первинної обмотки;  
 $w_2$  – кількість витків вторинної обмотки.

При підключенні навантаження у вторинній обмотці буде протікати змінний струм  $i_2$ , а на її затискачах встановлюється змінна напруга  $u_2$ . Змінний струм  $i_2$ , в свою чергу, створює змінний магнітний потік  $\Phi_2$ , який також замикається по магнітопроводу та, згідно з правилом Ленца, направлений протилежно магнітному потоку  $\Phi_2$ .



З виразу (6.1) випливає, що в будь-який момент часу відношення е.р.с., які наводяться в обмотках, дорівнює відношенню кількостей витків цих обмоток

$$k_T = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (6.2)$$

де  $k_T$  – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Вираз (6.2) справедливий не тільки для миттєвих значень, але і для амплітудних та діючих значень, тому то коефіцієнт трансформації трансформатора можна визначити приблизно дослідним шляхом: підключити до затискачів обмоток трансформатора вольтметри та поділити показання вольтметра в первинній обмотці на показання вольтметра у вторинній обмотці.

Якщо на затискачах первинної обмотки напруга більше, ніж напруга на затискачах вторинної обмотки, то трансформатор є **знижувальним**, при цьому  $w_1 > w_2$ , а  $k_T > 1$ , а якщо навпаки, то трансформатор є **підвищувальним**, при цьому  $w_1 < w_2$ , а  $k_T < 1$ . Трансформаторам притаманна **властивість оборотності** – один і той же самий трансформатор може бути й **знижувальним** й **підвищувальним** щодо напруги: все залежить від того, яка з обмоток приєднана до джерела живлення.

Режим роботи трансформатора, при якому його вторинна обмотка розімкнута, а на затискачі первинної обмотки подана номінальна напруга, має назву **холостий хід трансформатора**. Струм, який протікає в первинній обмотці трансформатора в цьому режимі – це струм холостого ходу. Якщо до затисків вторинної обмотки підключити споживачів електроенергії, то трансформатор почне працювати в **режимі навантаження**. При роботі однофазного трансформатора в елементах його конструкції спостерігаються наступні фізичні явища і процеси.

В первинній обмотці: явище електричного струму; явище електромагнетизму; явище електромагнітної індукції (самоіндукції); явище теплової дії струму; процес нагрівання обмотки.

У вторинній обмотці: явище електромагнітної індукції (взаємної індукції); явище електричного струму; явище електромагнетизму; явище теплової дії струму; процес нагрівання обмотки.

В магнітопроводі: явище електромагнітної індукції; явище вихрових струмів; явище теплової дії вихрових струмів; явище гістерезису; явище теплової дії гістерезису; процес нагрівання магнітопроводу.

Крім цього відбувається обмін тепловою енергією між елементами конструкції трансформатора і навколишнім середовищем.

При роботі однофазний трансформатор споживає з мережі електричну енергію однієї напруги, а віддає споживачу електричну енергію іншої напруги, а також відбуваються втрати енергії у вигляді теплоти в елементах конструкції трансформатора (як показано вище): втрати в обмотках, втрати в магнітопроводі. Розглянемо даний процес перетворення енергії на енергетичній діаграмі трансформатора – рисунок 6.2.

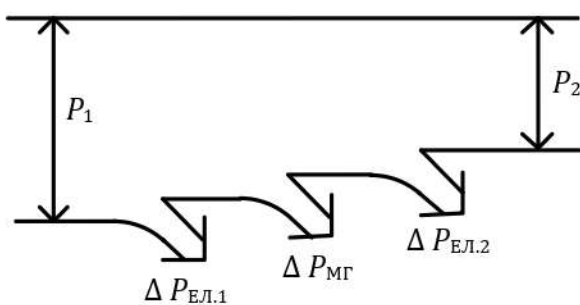


Рисунок 6.2 – Енергетична діаграма однофазного трансформатора

На енергетичній діаграмі позначено:

$P_1$  – активна потужність, яку споживає трансформатор,  $Вт$ ;

$\Delta P_{\text{ЕЛ.1}}$  – втрати активної потужності в первинній обмотці із-за теплової дії струму, який протікає в обмотці,  $Вт$ ;

$\Delta P_{\text{МГ}}$  – втрати активної потужності в магнітопроводі трансформатора із-за

теплової дії вихрових струмів і гістерезису,  $Вт$ ;

$\Delta P_{\text{ЕЛ.2}}$  – втрати активної потужності у вторинній обмотці із-за теплової дії струму, який протікає в обмотці,  $Вт$ ;

$P_2$  – активна потужність, яка віддається трансформатором,  $Вт$ .

Сума втрат активної потужності в трансформаторі дорівнює

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2 = \Delta P_{\text{ЕЛ.1}} + \Delta P_{\text{МГ}} + \Delta P_{\text{ЕЛ.2}}. \quad (6.3)$$

Втрати в обмотках трансформатора дорівнюють

$$\Delta P_{\text{ЕЛ.1}} = r_1 \cdot I_1^2, \quad (6.4)$$

$$\Delta P_{\text{ЕЛ.2}} = r_2 \cdot I_2^2, \quad (6.5)$$

де  $r_1, r_2$  – активні опори обмоток трансформатора, Ом;

$I_1, I_2$  – діючі значення сил струмів в обмотках трансформатора, А.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається за виразом

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P_{\Sigma}}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_1}. \quad (6.6)$$

Коефіцієнт потужності трансформатора дорівнює

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}, \quad (6.7)$$

де  $P_1$  – активна потужність, яку споживає трансформатор з мережі, Вт;

$S_1$  – повна потужність, яку споживає трансформатор з мережі, В·А.

Однофазні трансформатори, що випускаються для промислових цілей, призначені для роботи в заданих умовах з визначеними **параметрами**, які мають назву **номінальні**, до яких належать: номінальна повна потужність трансформатора, кВ·А; номінальна частота живильної мережі, Гц; діючі значення номінальних напруг обмоток, В; діючі значення номінальних струмів в обмотках, А. Основним технічним параметром трансформатора є його номінальна повна потужність, яка визначається

$$S_H = U_{2H} \cdot I_{2H}, \quad (6.8)$$

де  $U_{2H}$  – номінальна напруга вторинної обмотки, В;

$I_{2H}$  – номінальний струм вторинної обмотки, А.

## 6.2 Трифазний силовий трансформатор

**Трифазний силовий трансформатор** має магнітопровід, який містить три стрижні, які об'єднані зверху та знизу ярмами, на кожному стрижні розміщені

первинна і вторинна обмотки однієї фази. Початки первинних обмоток позначаються **A, B, C**, кінці – **X, Y, Z**, початки вторинних обмоток позначаються **a, b, c**, кінці – **x, y, z**.

Розглянемо принцип дії трифазного трансформатора. На затискачі первинних обмоток подаються змінні напруги  $u_A, u_B, u_C$ , зсунуті в часі на третину періоду або за фазою на кут  $120^\circ$ . В результаті в первинних обмотках будуть

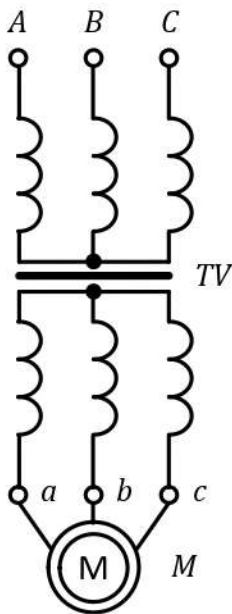


Рисунок 6.3 –  
Принципова електрична схема  
підключення електродвигуна до  
трифазного силового  
трансформатора

протікати змінні електричні струми  $i_A, i_B, i_C$ , які зсунуті за фазою на кут  $120^\circ$ . Це призводить до виникнення магнітних потоків  $\Phi_A, \Phi_B, \Phi_C$ , які також зсунуті за фазою на кут  $120^\circ$ . В цілому, принцип дії трифазного трансформатора аналогічний однофазному трансформатору. Первинна і вторинна обмотки трифазного трансформатора можуть бути з'єднані за схемами «зірка» або «трикутник». При цьому за номінальні напруги первинної і вторинної обмоток приймають лінійні напруги, тобто різницю потенціалів між початками фаз відповідних обмоток.

При роботі трифазного трансформатора в елементах його конструкції протікають фізичні явища і процеси, аналогічні явищам і процесам, що протікають в однофазному трансформатору, і тому в елементах конструкції трифазного трансформатора спостерігаються ті ж втрати, що й в однофазному трансформаторі.

Технічні параметри трифазних трансформаторів аналогічні однофазним трансформаторам. Наприклад, розшифруємо тип трансформатора ТМ-100/10/0,4: трансформатор масляний потужністю 100 кВА з номінальною первинною напругою 10 кВ і номінальною вторинною напругою 0,4 кВ.

### 6.3 Вимірювальні трансформатори напруги та струму

**Вимірювальний трансформатор напруги (ВТН)** призначений для розширення меж вимірювання вольтметрів, ватметрів та вимірювальних приладів з обмотками напруги, а також для включення у високовольтні мережі пристроїв захисту та автоматики. Будова такого трансформатора не відрізняється від будови силового трансформатора. ВТН виконуються як в однофазному, так і в трифазному виконанні. Принцип дії ВТН аналогічний силовому трансформатору. Номінальна напруга на затискачах вторинної обмотки, як правило, становить 100 В.

Коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги визначається за виразом

$$k_{\text{Т.Н}} = \frac{U_{1\text{Н}}}{U_{2\text{Н}}}, \quad (6.9)$$

де  $U_{1\text{Н}}$  – номінальна напруга первинної обмотки, В;

$U_{2\text{Н}}$  – номінальна напруга вторинної обмотки, В.

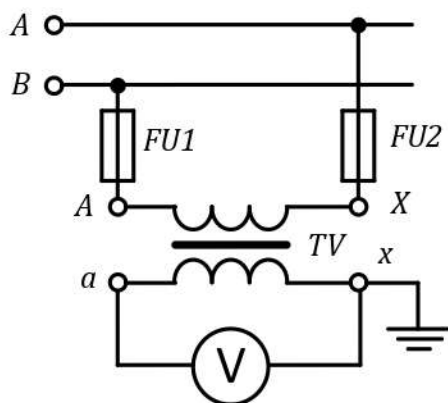


Рисунок 6.4 – Схема включення вольтметра через вимірювальний трансформатор напруги

Показання вимірювальних приладів, включених у вторинне коло трансформатора, необхідно помножити на коефіцієнт трансформації. При підключенні цих приладів треба враховувати, що їх сумарна потужність не повинна перевищувати номінальної потужності трансформатора. У протилежному випадку виникають похибки вимірювань за рахунок збільшення падіння напруги у вторинній обмотці трансформатора і зміни фази напруги, тому вимірювальні трансформатори напруги

мають похибку за напругою і кутову похибку. Номінальні потужності вимірювальних трансформаторів напруги – від 200 В·А до 2000 В·А.

Для безпечного обслуговування вторинна обмотка і корпус вимірювального трансформатора напруги заземлюються, щоб захистити персонал при пробі ізоляції первинної обмотки (обмотки високої напруги).

Вимірювальні трансформатори напруги підключаються до високовольтної мережі через запобіжники. Схема включення вольтметра до високовольтної мережі через вимірювальний трансформатора напруг наведено на рисунку 6.4.

**Вимірювальний трансформатор струму (ВТС)** призначений для розширення меж вимірювання амперметрів, ватметрів та вимірювальних приладів з обмотками струму. ВТС містить магнітопровід, первинну обмотку та її затискачі **Л1** та **Л2**, вторинну обмотку та її затискачі **И1** та **И2**. Кількість витків первинної обмотки набагато менше, ніж кількість витків вторинної обмотки. Первинна обмотка виконується на струми від 5 А до 15 кА, а вторинна обмотка – на струм 5 А. Первинна обмотка ВТС підключається до кола послідовно, у якому протікає вимірюваний струм, а вторинна обмотка замикається через вимірювальні прилади. Отже, такий трансформатор працює фактично в режимі короткого замикання, тому що струмові обмотки вимірювальних приладів мають незначні опори.

Коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму дорівнює

$$k_{\text{Т.С}} = \frac{I_{1Н}}{I_{2Н}}, \quad (6.10)$$

де  $I_{1Н}$  – номінальний струм первинної обмотки, А;

$I_{2Н}$  – номінальна струм вторинної обмотки, А.

Показання вимірювальних приладів, які підключені до вторинного кола ВТС, необхідно помножити на коефіцієнт трансформації.

Магнітопровід трансформатора розрахований на незначний магнітний потік, тому велике збільшення потоку приведе до перегріву магнітопроводу і виходу його з ладу. При холостому ході трансформатора, тобто при розмиканні вторинної обмотки при підключеній до мережі первинній обмотці магнітопро-

від буде неприпустимо перегріватися. Отже, збільшений, у порівнянні з номінальним, магнітний потік буде наводити у вторинній обмотці трансформатора е.р.с., яка дорівнює 500 В...1000 В.

Тому, **режим холостого ходу є для вимірювального трансформатора струму аварійним.**

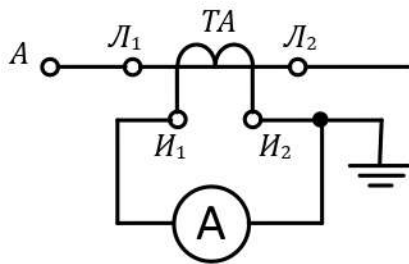


Рисунок 6.5 – Схема включення амперметра через вимірювальний трансформатор струму

Тому вторинна обмотка повинна бути замкнена на коротко при протіканні електричного струму в первинній обмотці. Для захисту персоналу корпус і вторинна обмотка трансформатора заземлюються.

Схема включення амперметра через ВТС до мережі живлення показана на рисунку 6.5.



## Лекція 10

### ТЕМА 6. ТРАНСФОРМАТОРИ. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

#### План лекції

6.4 Автотрансформатор

6.5 Зварювальний трансформатор

6.6 Основи електропостачання

#### 6.4 Автотрансформатор

Автотрансформатор, як спеціальний тип трансформатора, відрізняється від звичайного трансформатора тим, що вторинна обмотка з кількістю витків  $w_2$  є частиною первинної обмотки з кількістю витків  $w_1$ . Таким чином, обмотки мають електричний зв'язок. Розглянемо принцип дії автотрансформатора на його конструктивній схемі – рисунок 6.6.

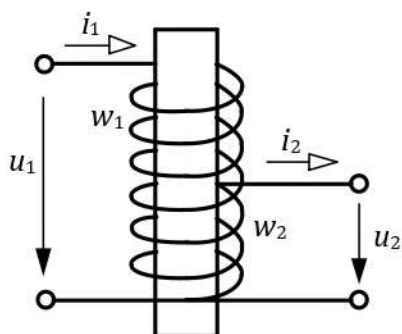


Рисунок 6.6 – Схема автотрансформатора

До первинного кола трансформатора підводиться змінна напруга  $u_1$ , причому на один виток обмотки приходить напруга  $u_1/w_1$ , а напруга, яка знімається з затискачів вторинного кола трансформатора дорівнює

$$U_2 = \frac{U_1}{w_1} \cdot w_2. \quad (6.11)$$

Коефіцієнт трансформації автотрансформатора дорівнює

$$k_T = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}. \quad (6.12)$$

При використанні автотрансформатора зменшуються електричні втрати потужності і витрати провідника обмотки. Автотрансформатор можна вмикати як за схемою зниження напруги, так й за схемою її підвищення. Стрілка на одному із виводів відповідає рухомому контакту, чим забезпечується можливість регулювання вторинної напруги. Поряд із перевагами, автотрансформатори



мають і недолік. Так, при обриві спільної ділянки обмоток більш висока напруга  $U_I$  безпосередньо попадає на навантаження, яке на цю напругу, як правило, не розраховане. Результатом може бути пошкодження цього навантаження і небезпека для обслуговуючого персоналу.

### 6.5 Зварювальний трансформатор

Зварювальний трансформатор призначений для електродугового зварювання. Це трансформатор, який перетворює електроенергію змінного струму напругою 220 В або 380 В у електроенергію змінного струму напругою від 65 В до 70 В, яка необхідна для стійкого горіння електричної дуги. Зварювальний трансформатор працює в режимі, близькому до короткого замикання, тому що опір електричної дуги незначний, тому то до вторинного кола трансформатора послідовно підключений індукційний регулятор струму - дросель, який має великий індуктивний опір. За конструкцією дросель містить роз'ємний магнітопровід та обмотку, яка розміщена на одному або на двох стрижнях – рисунок 6.7.

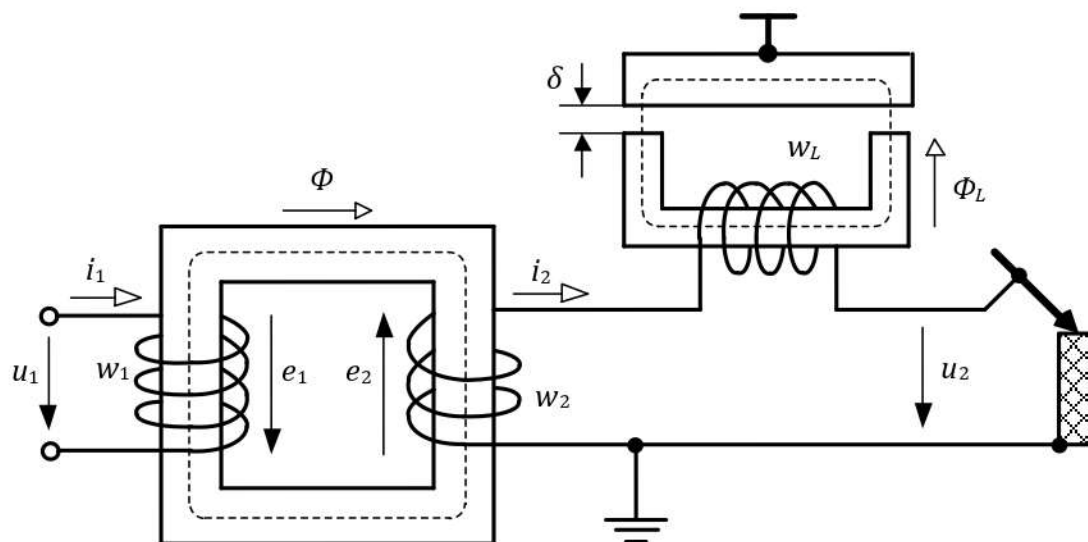


Рисунок 6.7 – Схема щодо конструкції та підключення зварювального трансформатора

Регулювання опору здійснюється шляхом зміни повітряного зазору між рухливою і нерухомою частинами магнітопроводу. Якщо на затискачі первинного кола подана змінна напруга  $u_1$ , а електрод не торкається металевої деталі,

то зварювальний трансформатор працює в режимі холостого ходу, тобто на затискачах вторинного кола напруга дорівнює  $65\text{ В} - 70\text{ В}$ . При замиканні вторинного кола шляхом дотику електрода до металевої деталі відбувається запалювання електричної дуги і автотрансформатор починає працювати в режимі навантаження. Під час зварювання металевий електрод під дією електричної дуги плавиться та утворює зварний шов. Для безпечного обслуговування зварювального трансформатора його вторинне коло заземлюється.

Залежність напруги на затискачах вторинного кола від сили струму в ній має назву **зовнішня характеристика зварювального трансформатора**. Сімейство зовнішніх характеристик зварювального трансформатора при зміні індуктивного опору дроселя наведено на рисунку 6.8.

Якщо в силового трансформатора зміна напруги на затискачах вторинного кола незначна при зміні сили струму в колі та складає  $5\% \dots 10\%$ , то у зварювального трансформатора зовнішня характеристика носить характер, що круто падає, тобто напруга на затискачах вторинного кола різко змінюється при зміні сили струму в колі.

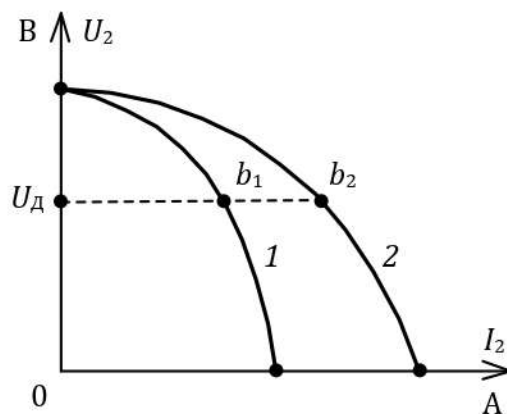


Рисунок 6.8 – Зовнішня характеристика зварювального трансформатора

Кожному значенню повітряного зазору в магнітопроводі індукційного регулятора струму відповідає певна зовнішня характеристика. Мінімальному зазору відповідає найменший струм (крива 1), а максимальному зазору – найбільший струм (крива 2). На перетинанні зовнішніх характеристик зварювального трансформатора з напругою електричної дуги ( $U_d$ ) знаходяться точки горіння дуги ( $b_1, b_2$ ). Привод рухливої частини магнітопроводу дроселя має покажчик, який дозволяє встановити силу зварювального струму.

Кожному значенню повітряного зазору в магнітопроводі індукційного регулятора струму відповідає певна зовнішня характеристика. Мінімальному зазору відповідає найменший струм (крива 1), а максимальному зазору – найбільший струм (крива 2). На перетинанні зовнішніх характеристик зварювального трансформатора з напругою електричної дуги ( $U_d$ ) знаходяться точки горіння дуги ( $b_1, b_2$ ). Привод рухливої частини магнітопроводу дроселя має покажчик, який дозволяє встановити силу зварювального струму.

## 6.6 Основи електропостачання

Електроенергія виробляється на електростанціях, які розташовані біля джерел первинної енергії, та передається до споживачів по лініям електропередач, тобто виробництво, передача та споживання електричної енергії – це єдиний у часі процес. Розглянемо основні терміни та означення в системі електропостачання:

- **електропостачання** – це область електроенергетики, що займається передачею і розподілом електричної енергії споживачам;
- **електроустановка** – це сукупність машин, апаратів, ліній і допоміжного устаткування, які призначені для виробництва, перетворення, передачі та розподілу електричної енергії;
- **електроприймач** – це апарат, механізм або агрегат, який призначений для перетворення електричної енергії в інші види енергії;
- **споживач електричної енергії** – це електроприймач або група електроприймачів, які об'єднані технологічним процесом і розташовані на певній території;
- **трансформаторна підстанція** – це електроустановка, яка призначена для прийняття, перетворення і розподілу електричної енергії, та яка містить трансформатори, розподільні пристрої, пристрої керування, релейний захист і автоматики та допоміжні споруди;
- **розподільний пристрій** – це частина підстанції, що призначена для прийому і розподілу електричної енергії, та яка містить комутаційні апарати, шини, пристрої захисту і автоматики;
- **електропостачання** – це процес забезпечення споживачів електричною енергією;
- **система електропостачання** – це сукупність комплектів електротехнічного устаткування, яке призначене для забезпечення споживачів електричною енергією;
- **електрична мережа** – це сукупність електроустановок для передачі і розподілу електричної енергії, яка містить підстанції, розподільні пристрої, струмопро-

води, повітряні і кабельні лінії електропередачі, які працюють на певній території;

- **енергетична система** – це сукупність електростанцій і мереж сполучених між собою і зв'язаних загальним режимом в безперервному процесі виробництва, перетворення і розподілу електричної енергії;

- **трифазна енергетична система** – це система виробництва, передачі та розподілу електроенергії, яка має загальне централізоване технічне керування;

- **об'єднана енергосистема** – це сукупність енергетичних систем, об'єднаних загальним режимом роботи;

- **єдина енергосистема** – це сукупність об'єднаних енергосистем, що охоплюють всю територію країни при загальному режимі роботи.

Електропостачання споживачів електричною енергією здійснюється від **джерела електропостачання**, а саме:

– від районних енергетичних систем – це **централізоване електропостачання**;

– від районних та міжрайонних електростанцій – це **децентралізоване електропостачання**.

Сучасна електрична система - рисунок 6.10, містить генератори електростанцій (ЕС), підвищувальні підстанції (ТП1...ТП3), знижувальні підстанції (ТП4...ТП9) та повітряні лінії (ПЛ1...ПЛ10). Таким чином, щоб передати електроенергію від джерела живлення до споживача, її необхідно декілька разів трансформувати.

На електростанціях України виробляється трифазна змінна напруга частотою 50 Гц. Генератори потужних електростанцій виробляють електроенергію напругою 6,3...21 кВ. Напруга основних споживачів електроенергії не перевищує 380...660 В. Електропостачання споживачів здійснюється через електричні мережі, які живляться від енергосистеми (об'єднаної енергосистеми), яка об'єднує велику кількість електростанцій.

Електроенергія від енергосистеми до споживача передається на значні відстані, що супроводжується втратою потужності, згідно формули

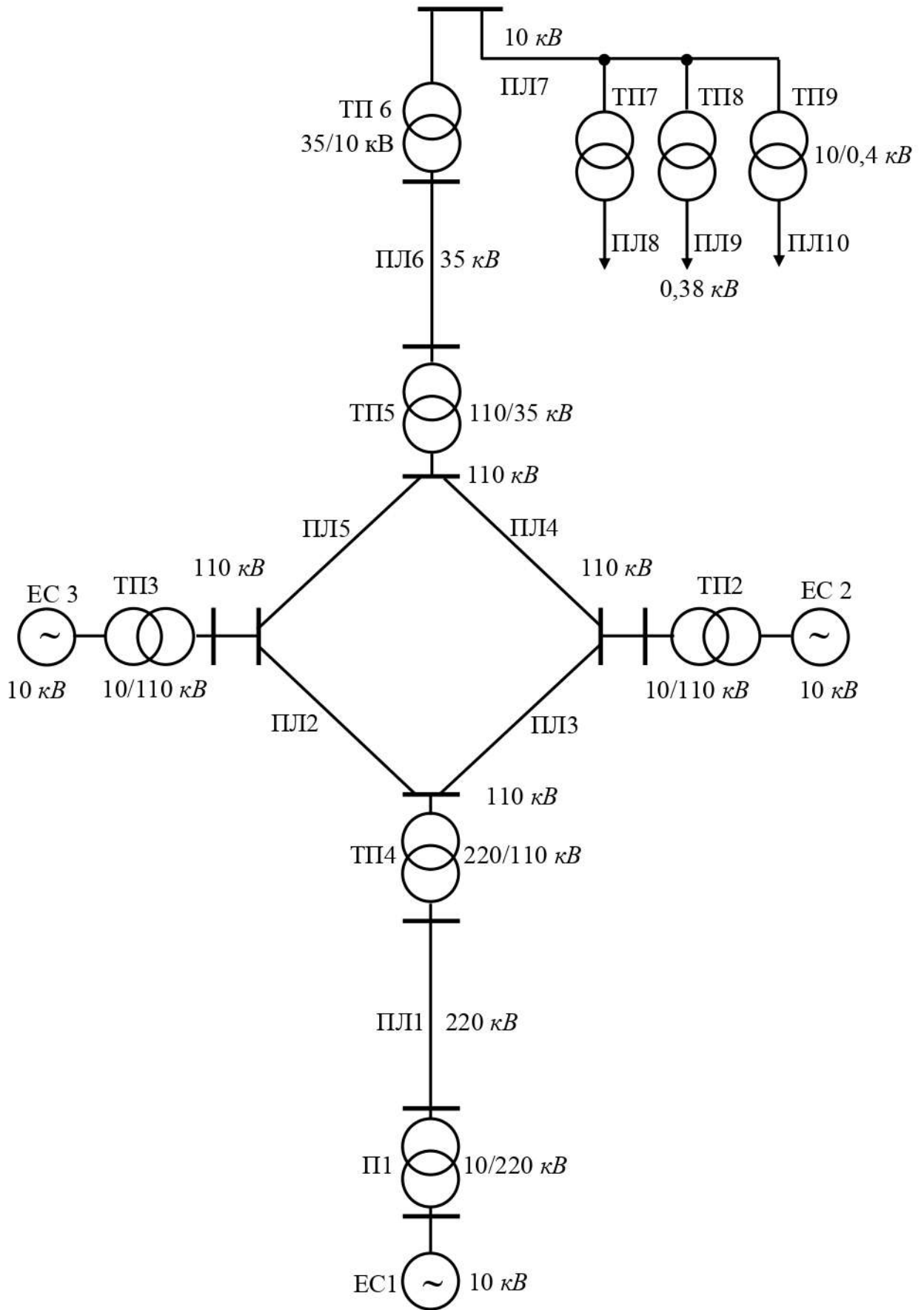


Рисунок 6.10 – Схема електричної системи

$$\Delta P = I^2 \cdot r_0 \cdot l, \quad (6.13)$$

де  $I$  – струм трифазної системи,  $A$ ;

$r_0$  – опір 1 км проводу,  $Om$ ;

$l$  – довжина лінії електропередачі,  $км$ .

Струм трифазної системи визначається за виразом

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}, \quad (6.14)$$

де  $P$  – потужність,  $кВт$ ;

$U$  – напруга,  $кВ$ ;

$\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності.

Аналіз виразу (6.14) показує, що при підвищенні напруги в мережі можна збільшувати потужність, що передається при незмінному струмі, а при незмінній потужності із збільшенням напруги зменшується сила струму. Тому то, без збільшення втрати потужності в лінії можна значно збільшити довжину ліній електропередачі. При передачі електроенергії на значні відстані стає доцільним підвищувати напругу на підвищувальних трансформаторних підстанціях.

Від електростанцій електрична енергія передається лініями електропередачі напругою 110, 220, 330, 500 та 750  $кВ$ . Для живлення споживачів при зниженій напрузі споруджуються ряд знижувальних підстанцій. Знижувальні трансформаторні підстанції поділяються на *районні* та *споживчі*. На районних трансформаторних підстанціях електрична енергія з напруги 35...500  $кВ$  знижується до напруги 6...110  $кВ$  і передається в розподільні мережі. Споживчі трансформаторні підстанції напругою 6...10/0,38  $кВ$  призначені для живлення розподільних трифазних чотирипровідних мереж напругою 0,38  $кВ$ .

### Контрольні запитання до теми 6

1. Що таке трансформатор? Опишіть конструктивну схему однофазного трансформатора та його принцип дії.
2. Що таке коефіцієнт трансформації однофазного трансформатора? Як визначити його аналітично?

3. Які фізичні явища, які спостерігаються в первинній, у вторинній обмотці та в магнітопроводі однофазного трансформатора?
4. Що таке енергетична діаграма однофазного трансформатора? Розшифруйте літерні позначення енергетичної діаграми.
5. Як визначити коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності однофазного трансформатора?
6. Який трансформатор є трифазний силовий? Опишіть принцип дії трифазного силового трансформатора з поясненням фізичних явищ, які спостерігаються в елементах конструкції трифазного силового трансформатора при його роботі.
7. Поясніть призначення вимірювального трансформатора напруги? Як аналітично визначається коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги?
8. Наведіть схему електричну принципову включення вольтметра до високовольтної мережі через вимірювальний трансформатор напруги.
9. Поясніть призначення вимірювального трансформатора струму? Як аналітично визначається коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму?
10. Наведіть схему електричну принципову включення амперметра до однофазного кола змінного струму через вимірювальний трансформатор струму.
11. В яких режимах працюють вимірювальні трансформатори струму та напруги?
12. Поясніть призначення автотрансформатора та опишіть його принцип дії.
13. Поясніть призначення зварювального трансформатора та опишіть його принцип дії.
14. Поясніть основні означення системи електропостачання.

### **Список літератури для вивчення теми 6**

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / В.І.Мілих, О.О.Шавьолкін. За ред. В.І.Мілих. – К.: Каравелла, 2007. – 688 с.

2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / Будіщев М.С. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.

3. Овчаров В.В. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва»/ В.В.Овчаров, О.Ю.Вовк. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.



## Лекція 11

### ТЕМА 7. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

#### ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

##### План лекції

7.1 Будова та принцип дії машин постійного струму

7.2 Генератори постійного струму

7.3 Двигуни постійного струму

##### 7.1 Будова та принцип дії машин постійного струму

Машина постійного струму містить нерухому частину - **індуктор** та рухому частину - **якір**. За конструкцією індуктор – це станина, всередині якої встановлені полюси, осердя яких є шихтованим з листів електротехнічної сталі. В індукторі створюється основний магнітний потік. Обмотка на полюсах статора має назву **обмотка збудження**. Затискачі обмотки збудження виводяться на клемну коробку машини і позначаються буквами **Ш1** і **Ш2**.

Якір машини має форму циліндра, який розташований на валу, на якому встановлені підшипники, які запресовані у підшипникові щити. Осердя якоря набирається з кілець електротехнічної сталі, в пазах осердя розташована обмотка якоря. Якірна обмотка, яка укладена в пази магнітопроводу якоря, складається з декількох витків, кожний з яких кріпиться до окремої колекторної пластини. На колекторні пластини накладаються **щітки**, затискачі яких виводять на клемну коробку і позначають буквами **Я1** і **Я2**. Сукупність таких колекторних пластин, які дозволяють при наявності змінної е.р.с. у якірній обмотці отримувати постійну полярність щіток, має назву **колектор**. Напруга з колектора знімається за допомогою **щіткового механізму**. Отже, призначення колектора і щіткового механізму в генераторі - це спрямлення електрорушійної сили, тобто перетворення змінної е.р.с. у постійну е.р.с..

Індуктор та якір машини відділені один від одного мінімальним **повітряним зазором**.

Якщо машина постійного струму працює як двигун, то за допомогою щіток на пластини колектора подається напруга. Якщо машина працює як генератором, то із щіток знімається постійна напруга.

## 7.2 Генератори постійного струму

**Генератор** – це електрична машина, у якій механічна енергія обертового вала перетворюється в електричну енергію. Принцип дії генератора заснований на явищі електромагнетизму та явищі електромагнітної індукції. Робочі властивості генераторів визначаються способом збудження в них магнітного поля. Розрізняють такі способи електромагнітного збудження машини постійного струму:

- **незалежне збудження;**
- **самозбудження** машини з наступними видами збудження: **паралельне, послідовне** та **змішане**.

При **незалежному збудженні** генератора обмотка збудження живиться постійним струмом від стороннього джерела, при цьому струм збудження не залежить від зміни режиму роботи машини.

При **самозбудженні** генератора обмотка збудження живиться струмом від якоря самого генератора. У випадку **паралельного збудження** генератора обмотка збудження підключається до затискачів якоря, при **послідовному** – послідовно в коло якоря, а при **змішаному** збудженні на полюсах машини за конструкцією розташовані дві обмотки збудження – паралельна і послідовна.

В магнітному полі індуктора при обертанні якоря в елементах конструкції генератора спостерігаються наступні фізичні явища і процеси.

В **індукторі**: явище електричного струму в обмотці збудження; явище електромагнетизму в обмотці збудження; явище теплової дії струму в обмотці збудження; процес нагрівання обмотки збудження.

В **якорі**: явище електромагнітної індукції в обмотці якоря; явище електричного струму в обмотці якоря; явище електромагнітної сили від дії струму в обмотці якоря; явище електромагнетизму в обмотці якоря; явище теплової дії

струму в обмотці якоря; процес нагрівання обмотки якоря; явище електромагнітної індукції в магнітопроводі якоря; явище вихрових струмів у магнітопроводі якоря; явище теплової дії вихрових струмів у магнітопроводі якоря; явище тертя в підшипниках; явище тертя між колектором та щітками; явище тертя якоря об повітря.

**Енергетична діаграма генератора** – це графічне зображення перетворення в ньому енергії з урахуванням втрат в елементах конструкції - рисунок 7.1. При роботі генератора частина споживаної ним енергії втрачається марно та розсіюється у вигляді теплоти. Втрачена енергія в одиницю часу має назву **втрати потужності** (або **втрати**). У генераторі є три види втрат енергії: втрати в механічній системі, втрати в електричних колах, втрати в магнітопроводі якоря.

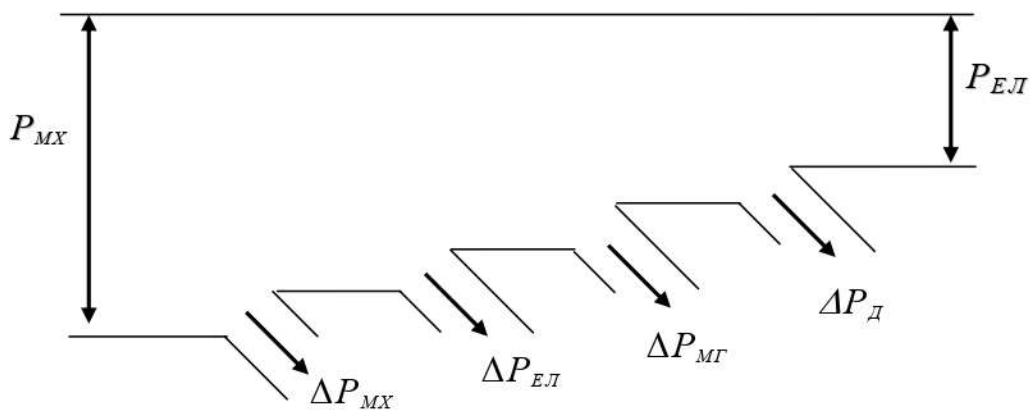


Рисунок 7.1 - Енергетична діаграма генератора

**Механічні втрати** ( $\Delta P_{MX}$ ) складаються з втрат на тертя в підшипниках ( $\Delta P_{ПДШ}$ ), з втрат на тертя між щітками та колектором ( $\Delta P_{ЩІТ}$ ) та з втрат на вентиляцію ( $\Delta P_{ВЕНТ}$ ) згідно виразу

$$\Delta P_{MX} = \Delta P_{ПДШ} + \Delta P_{ЩІТ} + \Delta P_{ВЕНТ}. \quad (7.1)$$

**Електричні втрати** ( $\Delta P_{EЛ}$ ) складаються з втрат в провідниках обмотки збудження в результаті теплової дії струму, який протікає в ній ( $\Delta P_3$ ), з втрат в провідниках обмотки якоря в результаті теплової дії струму, який проті-

кає в ній ( $\Delta P_{\text{Я}}$ ) та з втрат в щітках та колекторі в результаті теплової дії струму, який протікає в них ( $\Delta P_{\text{Щ}}$ ) згідно виразу

$$\Delta P_{\text{ЕЛ}} = \Delta P_{\text{З}} + \Delta P_{\text{Я}} + \Delta P_{\text{Щ}} = R_{\text{З}} \cdot I_{\text{З}}^2 + R_{\text{Я}} \cdot I_{\text{Я}}^2 + R_{\text{Щ}} \cdot I_{\text{Я}}^2, \quad (7.2)$$

де  $R_{\text{З}}$  – опір обмотки збудження, Ом;

$I_{\text{З}}$  – сила струму в обмотці збудження, А;

$R_{\text{Я}}$  – опір обмотки якоря, Ом;

$I_{\text{Я}}$  – сила струму в обмотці якоря, А;

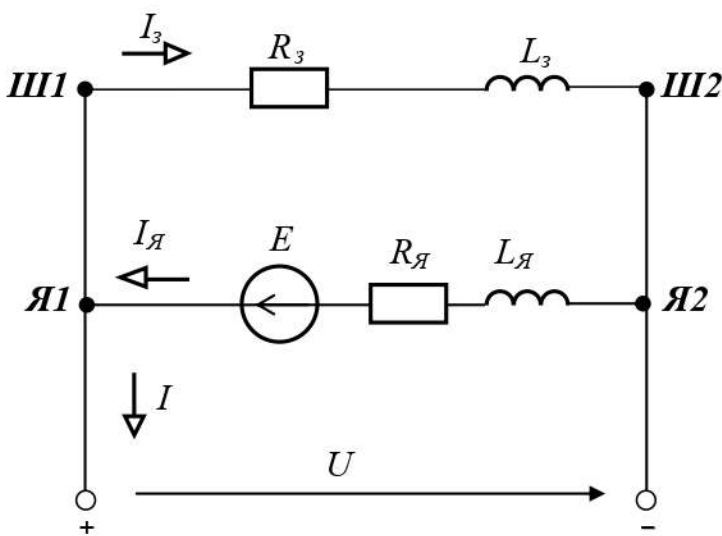
$R_{\text{Щ}}$  – опір щіткових контактів, В.

**Втрати в магнітопроводі** ( $\Delta P_{\text{МГ}}$ ) складаються з втрат в магнітопроводі якоря в результаті теплової дії вихрових струмів, які протікають у ньому ( $\Delta P_{\text{ВХ.Я}}$ ); з втрат в магнітопроводі якоря в результаті теплової дії гістерезису ( $\Delta P_{\text{ГС.Я}}$ ) згідно виразу

$$\Delta P_{\text{МГ}} = \Delta P_{\text{ВХ.Я}} + \Delta P_{\text{ГС.Я}}. \quad (7.3)$$

**Додаткові втрати** ( $\Delta P_{\text{Д}}$ ) виникають у генераторі в результаті інших не врахованих явищ.

Відповідно до фізичних явищ і процесів у колі збудження та у колі якоря розрахункова схема генератора із самозбудженням, а саме з паралельним збудженням наведена на рисунку 7.2.



$R_{\text{З}}$  – опір кола обмотки збудження, Ом;  $L_{\text{З}}$  – індуктивність обмотки збудження, Гн;  $I_{\text{З}}$  – сила струму в обмотці збудження, А;  $E$  – е.р.с., яка наводиться в обмотці якоря, В;  $R_{\text{Я}}$  – опір обмотки якоря, Ом;  $L_{\text{Я}}$  – індуктивність обмотки якоря, Гн;  $I_{\text{Я}}$  – сила струму в обмотці якоря, А;  $I$  – сила струму навантаження, А;  $U$  – напруга на затискачах генератора, В.

Рисунок 7.2 – Розрахункова схема генератора з паралельним збудженням

**Зовнішня характеристика генератора** – це залежність, яка показує, як змінюється напруга на затискачах генератора при зміні сили струму навантаження, а саме сили струму, який протікає в обмотці якоря.

**Рівняння зовнішньої характеристики генератора** має вигляд

$$U = E - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}. \quad (7.4)$$

За результатами аналізу виразу (7.4) можна сформулювати способи регулювання напруг на затискачах генератора:

- зміною сили струму в обмотці збудження, для чого використовується реостат, який підключається послідовно з обмоткою збудження;
- зміною швидкості обертання якоря, для чого використовується зовнішній приводний агрегат.

### 7.3 Двигуни постійного струму

Будова двигуна постійного струму аналогічна побудові генератора постійного струму. Як було зазначено вище, електричним машинам постійного струму притаманна властивість працювати як генератором, так і двигуном, яка має назву **оборотність**. Відмінністю двигуна від генератора постійного струму є призначення колектора і щіткового механізму. В двигуні постійного струму колектор і щітковий механізм призначені для зміни напрямку струму в провідниках обмотки якоря, тобто для збереження напрямку обертання якоря.

Розглянемо принцип дії двигуна постійного струму. Індуктор з обмоткою збудження, яка розташована на полюсах, створює основне магнітне поле. До обмотки якоря підводиться постійна напруга й у ній протікає електричний струм. При протіканні струму в обмотці якоря спостерігається явище електромагнітної сили. Сили, які діють на провідники обмотки якоря, створюють обертаючий момент і якорь двигуна починає обертатися. При обертанні якоря двигуна обмотка якоря пронизується змінним магнітним полем. Тому в ній виникає явище електромагнітної індукції та е.р.с., яка протилежна напрямку струму (*противо-е.р.с.*). У кожному з елементів конструкції двигуна протікають такі ж

фізичні явища та процеси, як і в генераторі, за винятком явища електромагнітної сили, яка діє на провідник зі струмом та замість гальмівної стає рушійною.

Енергетична діаграма двигуна постійного струму наведена на рисунку 7.3.

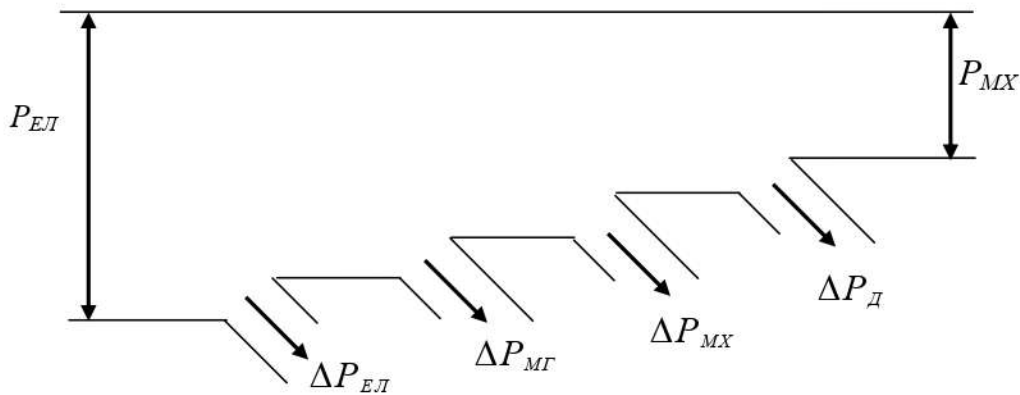


Рисунок 7.3 - Енергетична діаграма двигуна постійного струму

Обертаючий момент на валу двигуна ( $M$ ) дорівнює моменту опору механічного навантаження ( $M_{нав}$ ) згідно виразу

$$M = M_{нав}. \quad (7.5)$$

Момент, який розвивається на валу електродвигуна, дорівнює

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_A. \quad (7.6)$$

Механічна потужність на валу електродвигуна дорівнює

$$P_{MX} = M \cdot \omega, \quad (7.7)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання вала електродвигуна,  $рад/с$ .

Електрична потужність, яка споживається двигуном з мережі, дорівнює

$$P_{EL} = P_{MX} + \Delta P_{\Sigma}. \quad (7.8)$$

Коефіцієнт корисної дії електродвигуна дорівнює

$$\eta = \frac{P_{MX}}{P_{EL}} = \frac{P_{EL} - \Delta P_{\Sigma}}{P_{EL}} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{EL}}. \quad (7.9)$$

На рисунку 7.4 наведена розрахункова схема двигуна постійного струму.

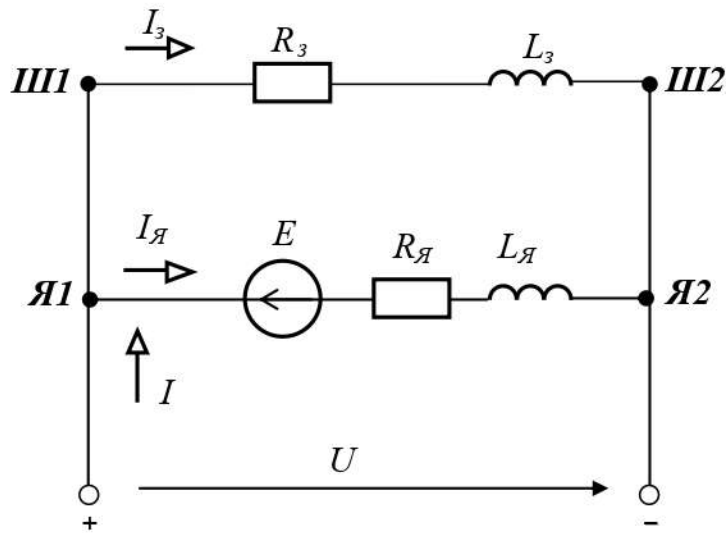


Рисунок 7.4 – Розрахункова схема двигуна постійного струму

**Швидкісна характеристика двигуна постійного струму** – це залежність кутової швидкості обертання якоря від сили струму в якорному колі, напруги на затискачах двигуна і магнітного потоку. Рівняння швидкісної характеристики двигуна має вигляд

$$\omega = \frac{U - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}}{k\Phi} \quad (7.10)$$

За результатами аналізу (7.10) можна сформулювати способи регулювання швидкості двигуна:

- зміною напруги на затискачах двигуна. Напругу, як правило, слід знижувати відносно номінального значення за допомогою регулятора напруги, тому швидкість двигуна можна регулювати тільки у бік зниження в порівнянні з номінальним значенням;
- зміною сили струму збудження. Силу струму збудження, як правило, слід зменшувати відносно номінального значення за допомогою реостата в колі збудження, тому швидкість двигуна можна регулювати тільки у бік підвищення в порівнянні з номінальним значенням;
- зміною сили струму якоря. Швидкість двигуна можна регулювати вниз від швидкості ідеального холостого ходу.



## Лекція 12

### ТЕМА 7. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

### ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

#### План лекції

7.4 Трифазні асинхронні електродвигуни

7.5 Трифазні синхронні електродвигуни

7.6 Однофазні двигуни змінного струму

#### 7.4 Трифазні асинхронні електродвигуни

Асинхронна електрична машина винайдена *М.О.Доліво-Добровольським* у 1889 р. Така машина застосовується для перетворення електричної енергії в механічну, тобто як електродвигун. В електроприводі промислових установок найбільшого розповсюдження набули **трифазні асинхронні електродвигуни** (потужністю від 0,06 до 400 *kW*), так як вони характеризуються простотою будови та малою собівартістю виробництва. Одно- і двофазні асинхронні мікродвигуни виконуються потужністю 500 *W* та використовуються в установках автоматичного керування, приладобудування, в електрифікованому інструменті та побутових приладах. Розглянемо конструкцію трифазного асинхронного електродвигуна (АД) з короткозамкненим ротором у поперечному розрізі – рисунок 7.5. Нерухома частина АД – **статор** встановлюється лапами на фундамент, а обертова частина – **ротор** утримується підшипниками, які закріплені в підшипникових щитах статора.

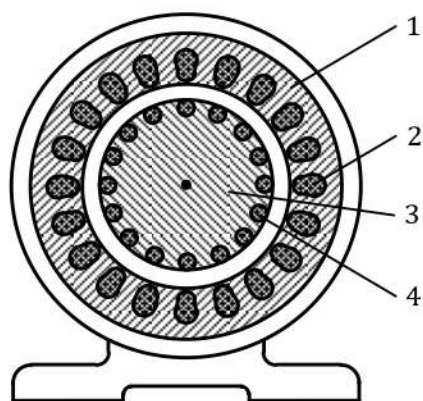


Рисунок 7.5 – Будова АД

Механічною основою статора 1 АД є корпус з алюмінієвого сплаву, який має ребра, що сприяють охолодженню АД та збільшують жорсткість конструкції. Безпосередньо в самому корпусі закріплено шихтоване феромагнітне осердя статора з листів електротехнічної сталі. На його внутрішній поверхні в пази вклядені мідні ізольовані провідники 2, які



з'єднуються лобовими частинами та створюють в цілому трифазну обмотку статора. Її кінці проведені в коробку електричних виводів і можуть далі увімкнені в трифазне електричне коло. На статорі також є захисний кожух з вентиляційними отворами і рим-болт для транспортування АД.

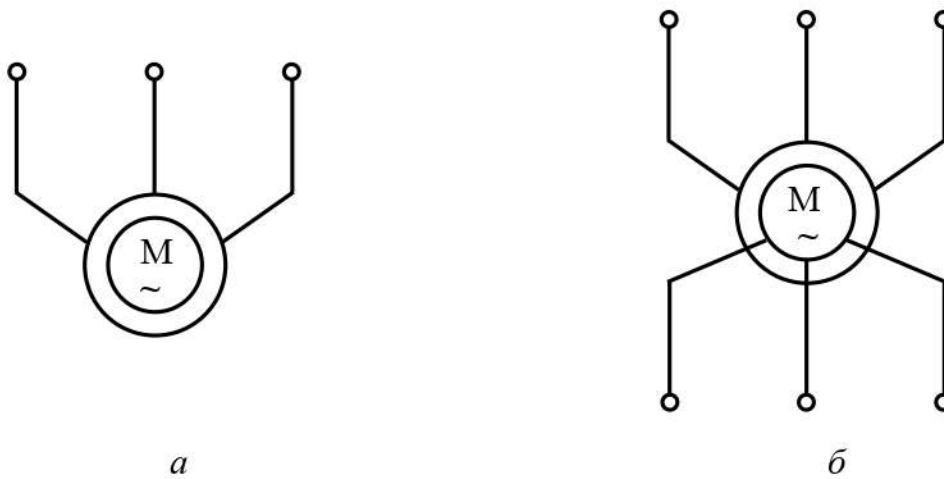
Механічною основою ротора є вал, вільний кінець якого може з'єднуватись з виконавчим механізмом. На вал насаджено шихтоване феромагнітне осердя ротора 3, в пазах на поверхні якого розташовані стрижневі провідники 4, які в торцях з'єднані короткозамкненими кільцями в єдину обмотку ротора. До ротора належить й вентилятор, який закріплений на кінці вала.

Осердя статора і ротора є магнітопроводом АД, його магнітним колом. Обмотки статора і ротора – це електричні кола АД. Трифазні обмотки статора зсунуті одна відносно одної на кут  $120^\circ$  та мають назву **фазні обмотки** або **фази** АД. Позначення початків фаз ( $U1, V1, W1$ ) та кінці ( $U2, V2, W2$ ). Слід відзначити, що для АД, які виготовлялись до 1987 р., виводи фазних обмоток статора позначали літерами  $C1-C4, C2-C5, C3-C6$ .

Трифазні обмотки статора можуть з'єднуватись за схемами «зірка» та «трикутник», а на три входні затискачі при роботі АД подається трифазна система напруг із мережі живлення.

Застосовується й інший вид обмотки ротора – це котушкова трифазна обмотка, яка подібна обмотці статора. Конструкція фазного ротора містить вал, контактні кільця, осердя ротора, пазові частини обмотки, лобові частини обмотки, вентиляційні канали, вивідні кінці фазних обмоток, що позначаються літерами  $K, L, M$ . Три фази обмотки ротора з'єднані в «зірку», а їхні вільні кінці приєднані до контактних кілець, на яких встановлено щітки, закріплені на статорі. Таким чином, за допомогою ковзних контактів у контури фазних обмоток вмикаються додаткові регульовальні опори трифазного реостату. Тому то можна констатувати, що існують два варіанти АД – рисунок 7.6:

- трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором;
- трифазний асинхронний електродвигун з фазним ротором.



*a* – асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором;  
*б* – асинхронний електродвигун з фазним ротором

Рисунок 7.6 – Умовні позначення АД

У АД з короткозамкненим ротором обмотка надійніша, дешевша, а АД має масове застосування. У АД з фазним ротором його обмотка ротора має регульовальні опори, що дає можливість керування АД при використанні його в спеціальних випадках електроприводу з регулюванням.

Розглянемо принцип дії АД. Щоб привести АД до дії, необхідно подати на вихідні затискачі трифазної обмотки статора трифазну систему напруг, унаслідок цього в обмотці статора починає діяти трифазна система змінних струмів. Завдяки просторовому зсуву фазних обмоток статора (кут  $120^\circ$ ) і часовим зсувам змінних струмів цих обмоток на третину періоду, в АД збуджується магнітне обертове поле, яке обертається з частотою  $n_1$ , яка дорівнює

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (7.11)$$

де  $f$  – частота мережі живлення, Гц;  
 $p$  – кількість пар полюсів обмотки статора.

При перетині лініями магнітного поля провідників обмотки ротора в них згідно закону електромагнітної індукції наводяться е.р.с. Під дією е.р.с. у провідниках обмотки ротора, які є короткозамкнені, виникають змінні струми. Так як провідники обмотки ротора зі струмами знаходяться в магнітному полі і на

них відповідно до закону Ампера діють сили Ампера. Напрямок таких сил призводить до створення обертального електромагнітного моменту, що діє на ротор, який обертається з частотою  $n_2$ . Усталене значення частоти обертання ротора досягається при рівності електромагнітного моменту ротора та гальмівного моменту опору, який діє на вал ротора зі сторони механічного навантаження. В асинхронних електродвигунах виявляється, що  $n_2 < n_1$ , тобто ротор обертається повільніше, ніж магнітне поле статора. Отже, обертове магнітне поле статора та ротор обертаються *асинхронно*, що й є основою для назви таких електродвигунів.

При частоті струму 50 Гц можливі наступні синхронні швидкості обертання магнітного поля статора АД,  $n_1 = 3000$  об/хв; 1500 об/хв; 1000 об/хв; 750 об/хв; 600 об/хв; 500 об/хв; 375 об/хв. Відставання ротора від обертового магнітного поля статора характеризується величиною  $s$ , що має назву **ковзання** та визначається за відношенням

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (7.12)$$

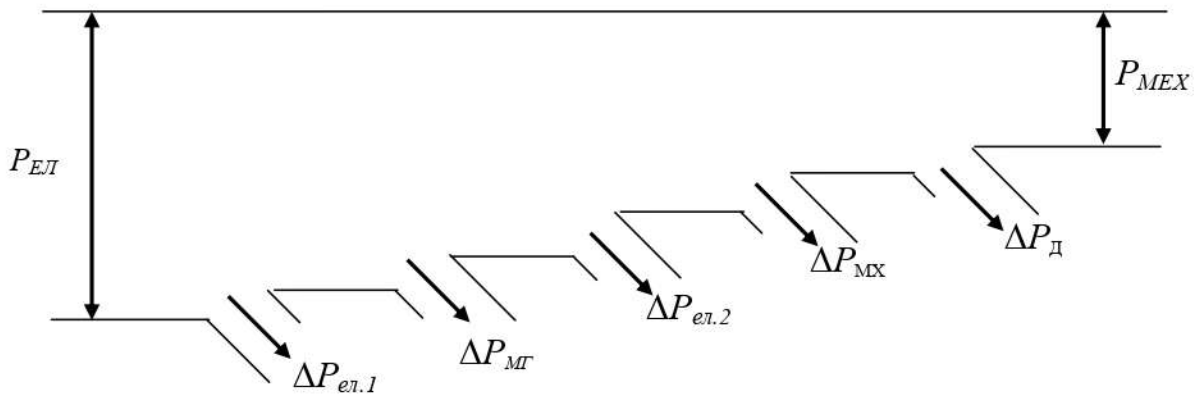
При роботі АД з короткозамкненим ротором в елементах його конструкції спостерігаються наступні фізичні явища і процеси:

- в *обмотці статора*: явище електричного струму; явище електромагнетизму; явище електромагнітної індукції; явище теплової дії струму; процес нагрівання обмотки;
- в *обмотці ротора*: явище електромагнітної індукції; явище електричного струму; явище електромагнітної сили; явище електромагнетизму; явище теплової дії струму; процес нагрівання обмотки;
- в *магнітопроводі*: явище електромагнітної індукції; явище вихрових струмів; явище електромагнітної сили від дії вихрових струмів; явище теплової дії вихрових струмів; явище гістерезису; явище теплової дії гістерезису; процес нагрівання магнітопроводу;

- в *механічній системі*: явище тертя в підшипниках; явище тертя ротора об повітря; процес нагрівання підшипників і ротора. Крім цього відбувається обмін тепловою енергією між елементами конструкції електродвигуна і навколишнім середовищем.

При роботі АД споживає з мережі живлення електричну енергію, а віддає робочій машині механічну енергію. При перетворенні АД електричної енергії в механічну відбуваються втрати енергії у вигляді тепла в елементах конструкції електродвигуна: втрати в обмотках, втрати в магнітопроводі, втрати в механічній системі та додаткові втрати.

Розглянемо даний процес перетворення енергії на енергетичній діаграмі АД – рисунок 7.7.



$P_{EЛ}$  – електрична потужність, яку споживає АД;  $\Delta P_{ел.1}$  – електричні втрати в обмотці статора;  $\Delta P_{МГ}$  – втрати в магнітопроводі АД;  $\Delta P_{ел.2}$  – електричні втрати в обмотці ротора;  $\Delta P_{МХ}$  – механічні втрати;  $\Delta P_{Д}$  – додаткові втрати;  $P_2$  – механічна потужність, яка віддається електродвигуном робочій машині

Рисунок 7.7 – Енергетична діаграма АД

Сума втрат активної потужності в АД дорівнює

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= P_{EЛ} - P_{МЕХ} = \Delta P_{EЛ.1} + \Delta P_{МГ} + \Delta P_{EЛ.2} + \Delta P_{МХ} + \Delta P_{Д} = (7.13) \\ &= \Delta P_{const} + \Delta P_{var}; \end{aligned}$$

$$\Delta P_{const} = \Delta P_{МГ} + \Delta P_{МХ}; \quad (7.14)$$

$$\Delta P_{var} = \Delta P_{EЛ.1} + \Delta P_{EЛ.2} + \Delta P_{Д}. \quad (7.15)$$

де  $\Delta P_{const}$  – **постійні втрати** в АД, Вт;

$\Delta P_{var}$  – **змінні втрати** в АД, Вт.

Коефіцієнт корисної дії АД з короткозамкненим ротором дорівнює

$$\eta = \frac{P_{EЛ}}{P_{MEХ}} = \frac{P_{EЛ} - \Delta P_{\Sigma}}{P_{EЛ}} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{EЛ}} \quad (7.16)$$

Коефіцієнт потужності АД дорівнює

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}, \quad (7.17)$$

де  $P_1$  – активна потужність, яку споживає АД, Вт;

$S_1$  – повна потужність, яку споживає АД, В·А.

### Механічна характеристика електродвигуна з короткозамкненим ротором

– це залежність кутової швидкості обертання ротора електродвигуна від моменту на його валу  $\omega = f(M)$  – рисунок 7.8.

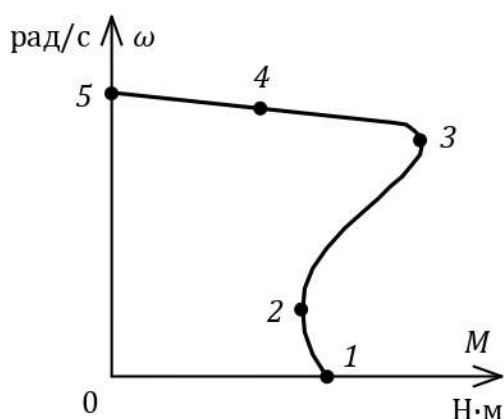


Рисунок 7.8 – Загальний вид механічної характеристики АД та її основні точки

Розглянемо алгоритм розрахунку основних точок механічної характеристики АД та її пояснення при роботі АД:

- точка 1: точка пуску – «пусковий режим»:

$$\omega = 0; s_{II} = 1; M = M_{II};$$

- точка 2: точка мінімального моменту при пуску:  $\omega = \omega_{MIN}; M = M_{MIN};$

- точка 3: точка критичної роботи:  $\omega = \omega_{KP}; s_{KP}; M = M_{KP};$

- точка 4: точка номінальної роботи:  $\omega = \omega_H; s_H; M = M_H;$

- точка 5: точка ідеального неробочий (холостий) хід:  $\omega = \omega_0; M = 0.$

Ділянка механічної характеристики від точки 1 до точки 3 відповідає нестійкій роботі АД, а ділянка від точки 3 до точки 5 – стійка робота електродвигуна.

Точки механічної характеристики АД можна розрахувати за паспортними та каталожними даними електродвигуна, для чого необхідні: номінальна потужність ( $P_{2H}$ ); кількість пар полюсів ( $p$ ); частота струму в мережі живлення ( $f$ ); номінальна швидкість обертання ( $n_H$ ); критичне ковзання ( $s_{KP}$ ); мінімальне ковзання ( $s_{MIN}$ ); кратність критичного моменту ( $m_{KP}$ ); кратність мінімального моменту ( $m_{MIN}$ ); кратність пускового моменту ( $m_{II}$ ).

**Кратності критичного, мінімального і пускового моментів** – це відношення зазначених моментів до номінального моменту. Алгоритм розрахунку величин для побудови механічної характеристики складається з етапів:

- визначення синхронної кутової швидкості обертання за виразом

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60}; \quad (7.18)$$

- визначення номінальної кутової швидкості обертання за виразом

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H); \quad (7.19)$$

- визначення критичної кутової швидкості обертання за виразом

$$\omega_{KP} = \omega_0 \cdot (1 - S_{KP}); \quad (7.20)$$

- визначення мінімальної кутової швидкості обертання за виразом

$$\omega_{MIN} = \omega_0 \cdot (1 - S_{MIN}); \quad (7.21)$$

- визначення номінального моменту за виразом

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\omega_H}; \quad (7.22)$$

- визначення критичного моменту за виразом

$$M_{KP} = m_{KP} \cdot M_H; \quad (7.23)$$

- визначення мінімального моменту за виразом

$$M_{MIN} = m_{MIN} \cdot M_H; \quad (7.24)$$

- визначення пускового моменту за виразом

$$M_{II} = m_{II} \cdot M_H. \quad (7.25)$$

## 7.5 Трифазні синхронні машини

**Синхронна електрична машина** – це машина змінного струму, принцип дії якої побудований на взаємодії магнітних полів ротора і статора, що обертаються з однаковою частотою (*синхронно*).

Застосовують синхронні машини (СМ) для перетворення механічної енергії первинних двигунів в електричну, тобто як генератори електричної енергії змінного струму. Трифазні генератори виробляють практично всю електроенергію, яка надходить до електроенергетичних систем усього світу. Порівняно невелика частка електроенергії виробляється синхронними генераторами, які встановлені на мобільних установках – локомотивах, автомобілях, літаках, кораблях. Синхронні машини використовують і, як електродвигуни, але й менше, ніж електродвигуни інших типів. Технічно й економічно обґрунтована нижня межа номінальних потужностей синхронних двигунів, яка складає 500...600 *кВт*. Більшість синхронних двигунів випускається як машини загального призначення, але є серії й типи двигунів, які призначені для конкретних типів механізмів. Синхронні машини можуть бути як однофазними, так й багатofазними. На електростанціях і в промислових установках найбільш розповсюджені трифазні синхронні машини – генератори і двигуни відповідно. Однофазні синхронні двигуни належать до мікродвигунів, і мають власні специфічні конструкції.

Трифазна синхронна машина є оборотною, з універсальною конструкцією та залежить від рівня потужності і частоти обертання, а саме, містить нерухомий статор та обертовий ротор усередині статора. Ротор і статор механічно взаємопов'язані через підшипники, а в активній частині їх роз'єднує повітряний проміжок. Механічна основа статора – це корпус у вигляді полого циліндра, у нижній частині якого приварені лапи для кріплення машини на фундаменті. З торців до корпусу примикають і кріпляться болтами підшипникові щити, що утримують підшипники за допомогою підшипникових кришок. Для транспортування машини на корпусі є рим-болт. Для проходу охолоджувального повітря на підшипникових щитах і захисному ковпаку встановлено жалюзі. У корпусі



закріплено шихтоване осердя статора, в пазах якого розташовані мідні ізолювані провідники обмотки статора, які з'єднуються лобовими частинами в секції. Секції з'єднуються одна з одною і створюють фазні обмотки. Кількість фазних обмоток дорівнює трьом, ці обмотки просторово розташовані по дузі окружності статора зі зсувом на 120 електричних градусів. Фазні обмотки з'єднуються одна за одною за схемою «зірка», а їхні зовнішні виводи  $U$ ,  $V$ ,  $W$  вмикаються в трифазну мережу, також можлива наявність нейтрального проводу. Таким чином, можна констатувати, що активна електромагнітна частина статора, до якої належить осердя статора й обмотка, аналогічна активній частині статора трифазного асинхронного електродвигуна.

Ротор синхронної машини – це електромагнітна система постійного струму з обмоткою, що має ту ж кількість полюсів, що й трифазна обмотка статора. Конструкція ротора може бути неявно- або явнополюсною. Механічна частина ротора – це вал, в активній частині він утворює ярмо, на якому кріпляться масивні, шихтовані полюси. На полюсах закріплюються котушки з мідного ізолюваного проводу. Ці котушки з'єднані одна з одною послідовно і створюють обмотку збудження. Щітки, що закріплені на статорі, і контактні кільця, що встановлені на валу, створюють ковзні електричні контакти, через які обмотка збудження з вивідними кінцями  $F1-F2$  живиться постійним струмом від будь-якого зовнішнього джерела. На роторі, крім обмотки збудження, є ще мідна або латунна *заспокійлива (демпферна)* обмотка, що сприяє загасанню коливань ротора при неусталених режимах роботи СМ. На валу ротора встановлюється вентилятор, який забезпечує охолодження машини потоком повітря.

Приклад умовного позначення СМ з чотирма виводами обмотки статора і неявно полюсним ротором наведений на рисунку 7.9.

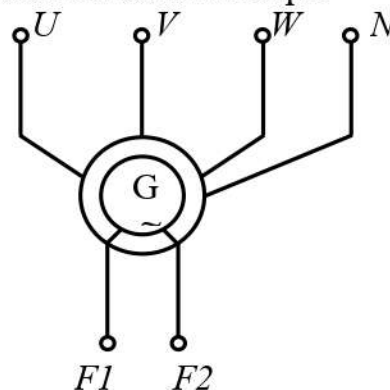


Рисунок 7.9 – Умовне позначення СМ



Розглянемо роботу трифазної синхронної машини в режимі генератора.

Щоб вироблялася електроенергія змінного струму з частотою  $f$ , ротор машини має  $p$  полюсів та обертається первинним двигуном з частотою обер-

тання  $n = \frac{60 \cdot f}{p}$ . При цьому обов'язковою умовою роботи синхронної маши-

ни є наявність основного магнітного потоку, який пронизує обмотку статора.

Цей потік  $\Phi_0$  створюється обмоткою збудження ротора, яку необхідно живити

постійним струмом  $I_3$ . Обертання ротора приводить до перетинання провідни-

ків трифазної обмотки статора магнітними силовими лініями, в результаті чого

в фазах цієї обмотки наводиться трифазна симетрична система е.р.с.  $e_A, e_B, e_C$ .

Діюче значення фазної е.р.с., як і в асинхронній машині, дорівнює

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot k_{об} \cdot \Phi_m, \quad (7.26)$$

де  $\Phi_m$  – амплітуда основного магнітного потоку, Вб;

$k_{об}$  – обмотковий коефіцієнт;

$w$  – кількість витків кожної фази обмотки статора.

Режим, при якому до виводів статора не підключено навантаження і вони

розімкнуті, має назву **холостий (неробочий) хід** синхронного генератора. Якщо

при цьому змінювати струм збудження  $I_3$ , буде змінюватися магнітний потік  $\Phi_m$

і е.р.с.  $E_o$ .

Залежність е.р.с.  $E_o$  від струму збудження  $I_3$  має назву **характеристика**

**холостого (неробочого) ходу** синхронного генератора.

Якщо до обмотки статора приєднати симетричне трифазне навантаження,

то в фазних обмотках діє трифазна система змінних струмів  $i_A, i_B$  і  $i_C$ , які по від-

ношенню до е.р.с. зсунуті за фазою на кут  $\psi$  через наявність реактивних опорів

у навантаженні і самих фазних обмоток статора. Обмотка статора з системою

струмів збуджує магнітне поле статора, яке характеризується магнітним пото-

ком  $\Phi_a$ . Таке магнітне поле обертається з частотою  $n_l$ , яка збігається з частотою

обертання ротора: магнітні поля статора і ротора обертаються синхронно, звід-

ки їй виникла назва машина – **синхронна машина**. В синхронному генераторі

єдине магнітне поле обертається з синхронною частотою 
$$n = \frac{60 \cdot f}{p}.$$

Вплив магнітного поля статора на магнітне поле машини прийнято називати **реакцією якоря**. Реакція якоря спотворює картину магнітного поля у порівнянні з її виглядом при холостому ході генератора, що приводить до ослаблення або посилення збудження машини в залежності від величини і характеру приєданого навантаження. На практиці при зміні струму навантаження синхронних генераторів для підтримання на затискачах обмотки статора заданої напруги необхідно змінювати магнітний потік обмотки збудження за допомогою регулювання її струму.

Розглянемо роботу трифазної машини в режимі двигуна.

Обмотка статора підключається до трифазної мережі змінного струму та забезпечує збудження магнітного поля. Для існування електромагнітного обертового моменту, що діє на ротор, його обмотка збудження повинна живитися від джерела постійного струму і збуджувати магнітне поле, силові лінії якого зчеплені з обмоткою статора. Взаємодія магнітних полів статора і ротора приводить до створення електромагнітного моменту. Тяжіння різнойменних полюсів статора і ротора забезпечує їхню жорсткий силовий зв'язок, тому ротор вимушено обертається з частотою  $n$  синхронно з полем статора. Незважаючи на порівняну простоту принципу дії, запуск синхронного двигуна спряжений з проблемами, а саме, при вмиканні обмотки статора в мережу живлення її магнітне поле практично миттєво набуває частоти обертання  $n_0$ . Ротор же не може миттєво набрати таку ж частоту обертання через механічну інерцію. Тому безперервна зміна взаємних позицій полюсів магнітного поля статора і полюсів ротора приводить до так званого «смикання» останнього то в один, то в інший бік. Щоб запустити ротор до нормального обертання, йому необхідно надати початкову кутову швидкість, яка близька до кутової швидкості обертання поля статора. Розгін здійснюється як у асинхронного електродвигуна з к.з. роторомі

при цьому працює заспокійлива обмотка. Після розгону обмотка збудження підключається до джерела живлення, в результаті чого ротор «доходить» до синхронної швидкості обертання. Можливий первісний розгін ротора при пуску синхронної машини і за допомогою малопотужного допоміжного електродвигуна іншого типу.

### **7.6 Однофазні двигуни змінного струму**

Ротор однофазного асинхронного електродвигуна побудований так само, як й трифазний електродвигун з короткозамкненим ротором. На статорі такого електродвигуна, у пазах магнітопроводу, укладена однофазна робоча обмотка, яка займає  $2/3$  пазів статора. В іншій частині ( $1/3$  пазів) статора укладена пускова обмотка, яка зсунута в просторі щодо робочої на кут  $90^\circ$ .

Пускова обмотка підключається тільки на період пуску і після досягнення двигуном усталеної швидкості обертання вона відключається, а електродвигун продовжує працювати з однією робочою обмоткою, тому пускова обмотка виконується з проводу меншого перерізу, ніж робоча обмотка. Обмотки статора підключаються до однофазної мережі живлення, причому пускова обмотка підключається через фазозсувний елемент, як правило, це конденсатор або резистор. Це необхідно, щоб створити в момент пуску фазовий зсув між струмами в обмотках статора на кут  $90^\circ$ .

В результаті того, що обмотки статора зсунуті в просторі на кут  $90^\circ$ , а струми в обмотках статора зсунуті за фазою на кут  $90^\circ$ , в однофазному електродвигуні створюється обертове магнітне поле. Фізичні явища і процеси в роторі такого електродвигуна аналогічні трифазному двигуну з короткозамкненим ротором.

## Контрольні запитання до теми 7

1. Що таке електрична машина постійного струму? Опишіть конструкцію такої електричної машини.
2. Що таке генератор постійного струму (ГПС)? Опишіть конструктивну схему ГПС та його принцип дії.
3. Які існують види збудження генераторів постійного струму? Охарактеризуйте кожен вид збудження.
4. Які фізичні явища спостерігаються в механічній системі, у колі збудження, у колі якоря та в магнітопроводі генератора постійного струму?
5. Як аналітично визначається коефіцієнт корисної дії ГПС?
6. Що таке двигун постійного струму (ДПС)? Опишіть конструктивну схему ДПС та його принцип дії.
7. Що таке незалежне збудження та самозбудження ДПС?
8. Які фізичні явища спостерігаються в колі збудження, в колі якоря, в магнітопроводі та в механічній системі двигуна постійного струму?
9. Охарактеризуйте енергетичні діаграми ГПС та ДПС та розшифруйте літерні позначення.
10. Як аналітично визначається коефіцієнт корисної дії ДПС?
11. Що таке трифазний асинхронний електродвигун (АД)? На якому явищі заснований принцип АД?
12. Опишіть конструкцію АД з короткозамкненим ротором та його принцип дії
13. Що таке ковзання АД? Як аналітично визначається ковзання?
14. Які фізичні явища спостерігаються в обмотці статора. в обмотці ротора, в магнітопроводі та в механічній системі АД?
15. Охарактеризуйте енергетичну діаграму АД та розшифруйте літерні позначення.
16. Як аналітично визначається коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності АД?
17. Що таке механічна характеристика АД? Наведіть її загальний вид, вкажіть на ній п'ять основних точок та укажіть їх координати.

18. Які паспортні та каталожні дані необхідні для розрахунку механічної характеристики АД? Що таке кратності моментів АД?
19. Приведіть алгоритм розрахунку механічної характеристики трифазного асинхронного електродвигуна за паспортними і каталожними даними.

### **Список літератури для вивчення теми 7**

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / В.І.Мілих, О.О.Шавьолкін. За ред. В.І.Мілих. – К.: Каравелла, 2007. – 688 с.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / Будіщев М.С. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
3. Овчаров В.В. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / В.В.Овчаров, О.Ю.Вовк. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.
4. Паначевний Б.І. Загальна електротехніка: теорія і практикум / Б.І. Паначевний, Ю.Ф. Свєргун. – Київ: Каравела, 2003. – 440 с.

**Лекція 13**  
**ТЕМА 8. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ**

**План лекції**

- 8.1 Загальні поняття про електричні апарати
- 8.2 Узагальнена структура електричного апарата
- 8.3 Комутаційні апарати
- 8.4 Реле
- 8.5 Запобіжники

**8.1 Загальні поняття про електричні апарати**

*Електричні апарати (ЕА)* – це технічні засоби, які призначені для керування електричним струмом і пов'язаними з ним величинами. ЕА виконують такі функції: комутація (вмикання і вимикання) ЛЕП, розподільчих електричних мереж і електротехнічних пристроїв; захист електротехнічного обладнання від аварійних режимів; автоматичне і неавтоматичне регулювання та зміна електричного струму; контроль параметрів струму для подачі інформації на вихідні органи апаратів захисту і керування.

Електричні апарати умовно поділяють на такі основні види:

- *апарати високої напруги*, як і призначені для керування електричними мережами високої напруги (6; 10; 20; 35; 110; 220; 330; 500; 750; 1150 кВ). До роботи з такими апаратами допускається тільки спеціально підготовлений персонал;
- *апарати керування*, які керують режимами роботи і здійснюють автоматичний захист від аварійних режимів електротехнічного обладнання і розподільчих мереж на номінальні напруги 127; 220; 380; 500; 660; 1140 В;
- *електричні апарати автоматики* контролюють електричні і неелектричні параметри працюючого обладнання за допомогою генерації і подачі сигналів у кола автоматики і керування;
- *автоматичні регулятори і стабілізатори* регулюють і підтримують на заданому рівні різні параметри працюючого електрообладнання.

Схема електрична принципова для ілюстрації використання електричних апаратів у системі електроживлення трифазного асинхронного електродвигуна наведена на рисунку 8.1.

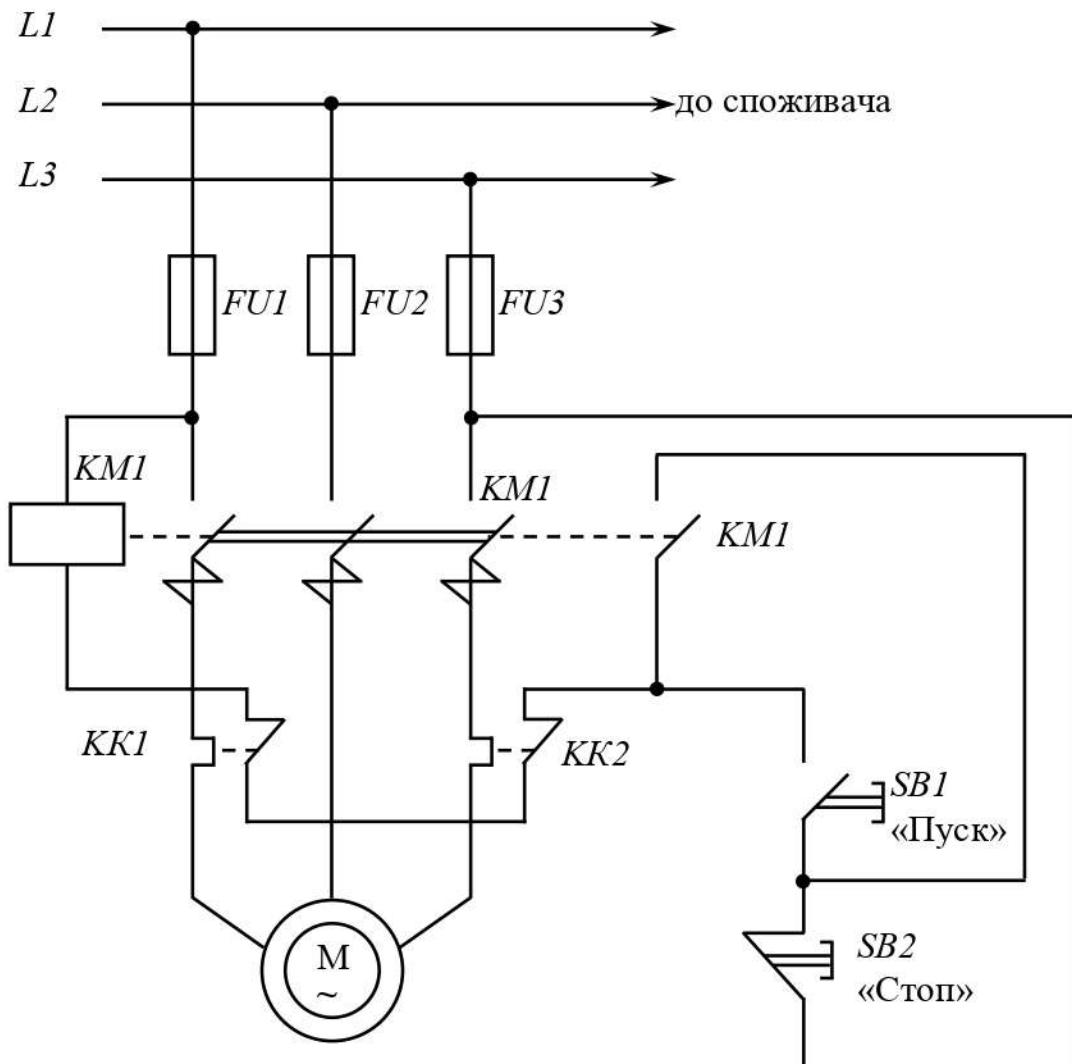



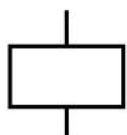
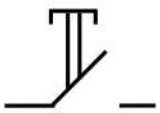

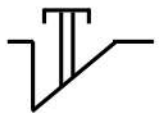
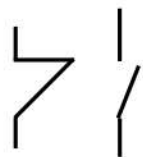
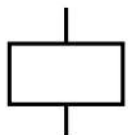
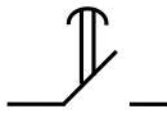
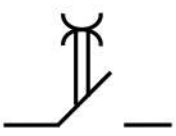
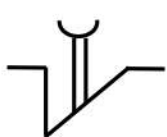
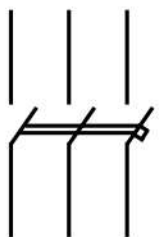

Рисунок 8.1 - Схема електрична принципова для ілюстрації використання електричних апаратів

В таблиці 8.1 наведені умовні та літерні позначення електричних апаратів для схем електричних принципів.

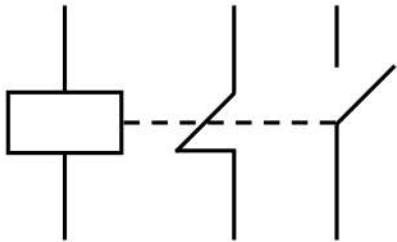
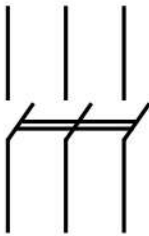

## 8.2 Узагальнена структура електричного апарата

За принципом дії, призначенням і конструкцією ЕА дуже різноманітні. Для загального уявлення про них скористуємося умовною блок-схемою, яка наведена на рисунку 8.2.

Таблиця 8.1 - Умовні та літерні позначення електричних апаратів

Найменування ЕА	Графічне зображення ЕА	Літерне позначення ЕА	Найменування ЕА	Графічне зображення ЕА	Літерне позначення ЕА
Рубильник		$Q$	Котушка контактора постійного струму		КМ
Кнопка з контактом, що замикається		$SB$	Головний сильно струмовий контакт з дугогасінням		КМ:1
Кнопка з контактом, що розмикається		$SB$	Допоміжні блок-контакти		КМ:2 КМ:3
Реле часу		КТ	Контакт реле часу, що замикається з витримкою часу		КТ:1
Контакт реле часу, що замикається та розмикається з витримкою часу		КТ:2	Контакт реле часу, що розмикається з витримкою часу		КТ:3
Автоматичний вимикач		QF	Запобіжник		FU



Найменування ЕА	Графічне зображення ЕА	Літерне позначення ЕА
Струмове реле		КА
Головні сильнотрумові контакти електромагнітного пускача		КМ
Контакти теплового реле		КК

Електричний апарат розглядається як керуючий привод, що замикає і розмикає контакт  $Q$  в комутованому електричному колі (КЕК), а в загальному випадку це може бути і структура контактів.

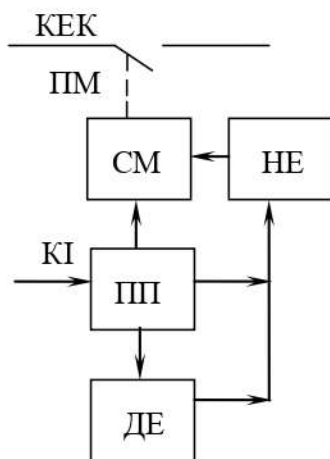


Рисунок 8.2 –  
Узагальнена  
структурна схема ЕА

Привод ЕА – це система взаємопов'язаних пристроїв і механізмів, які призначені для виконання заданих механічних операцій. У ЕА можуть використовуватися ручні, електромагнітні, електродинамічні, пружинні, пневматичні, гідравлічні приводи. Черговий робочий цикл ЕА ініціюється надходженням командного імпульсу КІ – це механічне натискання, електричний або сигнал з датчика або елемента електричного кола. За допомогою КІ приводиться до дії пусковий пристрій (ПП), який

запускає привод до руху і забезпечує спрацьовування електричного апарату. ПП може бути кнопкою, тиристором, електромагнітом, гідравлічним або пневматичним клапаном. Якщо енергії КІ недостатньо для спрацьовування ЕА, тоді знадобиться джерело енергії (ДЕ), а якщо джерело малопотужне, то енергія попередньо запасується в накопичувачі енергії (НЕ), яким може бути акумулятор, конденсатор, пружинний механізм. Таким чином, або безпосередньо під дією ПП, або за допомогою ДЕ і НЕ силовий механізм (СМ), наприклад, електромагніт через передаточний механізм (ПМ) переміщує рухомі контакти і, таким чином, ЕА спрацьовує.

### **8.3 Комутаційні апарати**

*Комутаційні апарати* призначені для керування електричними колами і різними електротехнічними пристроями. До таких апаратів належать:

- *апарати ручного керування* – рубильники, вимикачі-роз'єднувачі, кнопки керування;
- *апарати автоматичного керування* здійснюють комутацію сильно струмових контактів за допомогою силового електромагнітного механізму – контактори постійного та змінного струму, електромагнітні пускачі, автоматичні вимикачі та диференційні автомати;
- *автоматичний повітряний вимикач* для нечастого вмикання і вимикання електричного кола.

Ряд комутаційних апаратів можна продовжити такими електричними апаратами, як пакетні вимикачі, універсальні перемикачі, кінцеві та шляхові вимикачі, кнопкові станції – вмикання та вимикання таких апаратів здійснюється ручним і автоматичними способами.

**Рубильник** розрахований на ручний привод і він комутує електричне коло між силовими вводами. При вмиканні в нерухомий контакт спочатку входить допоміжний ніж, а потім головний ніж. При розмиканні спочатку виходить головний ніж без створення електричної дуги і без ерозії основних струмонесучих поверхонь, а потім усі функції перебирає на себе допоміжний ніж.

**Вимикач - роз'єднувач** призначений для комутації змішаних активних та індуктивних навантажень, які вже захищені від надструмів іншими комутаційними апаратами та широко застосовується для комутації обліково-розподільного обладнання житлових та громадських будівель та споруд, де передбачається оперативне відключення від мережі окремих груп споживачів або ланок електрокомутації.

Часті вмикання і вимикання потужних електричних кіл при напрузі до 500-600 В при нормальному режимі роботи проводяться **електромагнітними контакторами**.

**Електромагнітний пускач** – це низьковольтний електромагнітний пристрій, який призначений для дистанційного керування АД, а також для захисту електродвигунів від перевантажень і від струмів, що виникають при обриві однієї з фаз при комплектації тепловим реле.

Всередині електромагнітного пускача – рисунок 8.3, розміщена електромагнітна система, що містить нерухому Ш-образну частину осердя 1 і обмотку 2, намотану на котушку. Осердя набране з ізолюваних друг від друга (для зменшення втрат від вихрових струмів) листів електротехнічної сталі.

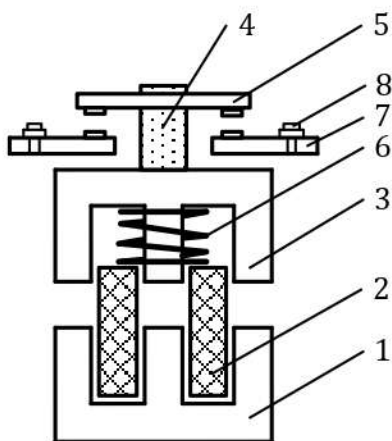


Рисунок 8.3 –  
Схема конструкції  
електромагнітного пускача

Рухлива частина осердя 3 (якір) з'єднана із пластмасовою траверсою 4, на якій змонтовані контактні містки 5 з рухливими контактами.

Повернення контактів у вихідне положення забезпечується пружиною 6. Нерухомі контакти припаяно до контактних пластин 7, що мають гвинтові затискачі 8 для приєднання проводів зовнішніх кіл.

Крім головних контактів, пускачі мають додаткові (блокувальні) контакти, розташовані на бічних поверхнях апарата. Головні контакти закриті криш-

кою, що захищає їх від забруднення, випадкових доторкань і міжфазних замикань.

Принцип дії електромагнітного пускача: при подачі напруги живлення по котушці проходить електричний струм, осердя намагнічується й притягує якір, головні контакти замикаються, й по головному колу протікає струм. При відключенні пускача котушка знеструмлюється, під дією зворотної пружини якір вертається у вихідне положення, головні контакти розмикаються;

Для нечастого вмикання і вимикання електричного кола використовують *автоматичний повітряний вимикач*. Головний елемент такого пристрою – це *розчіплювач*, який контролює заданий параметр кола і впливає на контакту систему автомата. За конструкцією це механізм з рухомою системою, що працює під тепловою або магнітною дією струму. Наприклад, тепловий розчіплювач призначений для захисту від теплового перевантаження. Чутливим елементом такого розчіплювача є *біметалева пластина*, в якій коефіцієнт температурного розширення однієї пластини дуже великий, а другої – дуже малий. При певному співвідношенні значення струму і тривалості його протікання біметалева пластина деформується, прогинається вгору і розмикає контакт у колі котушки електромагніту контактора. Магнітний (миттєвий) роз'єднувач – це соленоїд, рухомий сердечник якого також може приводити в дію механізм розчеплення. Струм, що проходить через вимикач, протікає по обмотці соленоїда і викликає втягування осердя при перевищенні заданого порогу. Миттєвий роз'єднувач, на відміну від теплового, спрацьовує дуже швидко (за частки секунди).

Серед комутаційних апаратів особливе місце займає **диференційні автомати**, які характеризуються наявністю визначеної уставки спрацьовування за струмом і забезпечують ефективний захист людини від ураження струмом у разі його доторкання до струмоведучих частин або елементів електроустаткування, які опинилися під напругою через ушкодження ізоляції. Чутливим елементом такого дифавтомату є диференційний трансформатор, через осердя якого проходять усі провідники мережі живлення. Ці провідники є первинною обмоткою, сумарний струм якої при нормальному режимі роботи дорівнює нулю.

Тому у магнітопроводі магнітний потік не виникає, отже у вторинній обмотці такого трансформатора напруга дорівнює нулю. В початковому положенні якір розчіплювача притягнутий постійним магнітом – механізм керування зведений.

При появі струму витікання на заземлені елементи через порушену ізоляцію або через тіло людини, що доторкнулася до електроустаткування, рівність струмів у провідниках порушується. В осерді магнітопроводі виникає магнітний потік, а у вторинній обмотці – напруга. Здійснюється скидання механізму керування, вимикач спрацьовує і відключає живлення аварійного електроустаткування.

#### 8.4 Реле

*Реле* – це слабкострумовий електричний апарат, в якому при плавній зміні керуючого параметра відбувається стрибкоподібна зміна керованого параметра. Реле класифікуються за:

- за сферою застосування: реле для схем автоматики, реле для керування електроприводами і їхнього захисту, а також реле для захисту енергосистем;
- за фізичною величиною, на яку реагує реле: теплові реле, струмове реле, реле напруги, реле від замикань на землю, частотне реле та реле спеціального призначення;
- за принципом дії: електромагнітні реле, індукційні реле, магнітоелектричні реле, електродинамічні реле та електронні реле;
- за принципом реагування: максимальні, мінімальні, спрямованої дії, диференціальні, балансні;
- за часом спрацьовування: швидкодіючі (до 0,05 с до моменту спрацювання), нормальні (0,15 с до моменту спрацювання), сповільнені (до 1 с до моменту спрацювання), реле із затримкою часу (більше 1 с). При спеціальній затримці часу спрацьовування (з можливістю регулювання) реле має назву **реле часу**.

Розглянемо більш детально теплове реле. Реле призначені для комплектації з електромагнітним пускачем з метою захисту електродвигунів від перевантажень неприпустимої тривалості та від струмів, що виникають при обриві од-

нієї з фаз. Чутливим елементом реле є біметалева пластина, через яку протікає струм. Якщо тепловий фактор  $R_n \cdot I^2 \cdot t$  (де  $R_n$  – опір пластини;  $t$  – час дії струму) перевищує допустиму величину, то біметалева пластина розгинається і піднімає контактну пластину. Контакти реле розімкнуться, як наслідок, теплове реле спрацювало. Після охолодження пластини все повертається у вихідний стан. При протіканні струму пластини нагріваються і вигинаються. Ступінь вигину пластини залежить від величини струму, що протікає крізь реле.

### 8.5 Запобіжники

**Запобіжники** належать до засобів захисту споживачів і кіл їх живлення від струмів короткого замикання і струмів перевантаження. Існують два види запобіжників: **плавкі запобіжники** і **термобіметалеві запобіжники**.

Плавкі запобіжники призначені для захисту електричних мереж від перевантажень і коротких замикань. Плавкий запобіжник містить дві основні частини: корпус *1* з електроізоляційного матеріалу (скла, кераміки) і плавка вставка *2* – рисунок 8.4. Плавкі вставки можуть бути з дроту або стрічки, матеріал яких свинець, цинк, сплав свинцю та олова, а також мідь. Виводи плавкої вставки з'єднані із клеммами *3*, за допомогою яких запобіжник включається в лінію послідовно зі споживачем, що захищається, або ділянкою електричного кола.

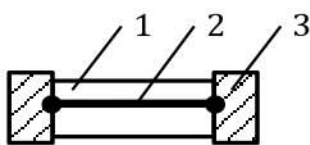


Рисунок 8.4 –  
Плавкий запобіжник

Для цього використовують спеціальні клемні тримачі, які забезпечують надійний контакт запобіжника. Якщо струм плавкої вставки перевищує допустиме значення, вона нагрівається до температури плавлення металу, з якого виконана, і розплавляється. Час спрацьовування запобіжника повинен бути менше часу нагрівання ізоляції проводу, по якому проходить струм короткого замикання, до максимально допустимої температури. Час спрацьовування залежить від сили струму, а також від температури навколишнього середовища.

Поряд з плавкими запобіжниками є і термобіметалеві запобіжники, чутливим елементом якого є біметалева пластина, що нагрівається струмом корот-



кого замикання. Такі запобіжники є апаратами багаторазової дії, що переривають і автоматично замикають електричне коло.

### **Контрольні запитання до теми 8**

1. Що таке електричні апарати?
2. Які існують види електричних апаратів? Наведіть приклади.
3. Які існують види комутаційних апаратів? Наведіть приклади.
4. Опишіть конструкцію та принцип дії магнітного пускача.
5. Опишіть конструкцію та принцип дії автоматичного вимикача.
6. Опишіть конструкцію та принцип дії диференційного автомата.
7. Що таке реле? Як класифікуються реле?
8. Опишіть конструкцію та принцип дії теплового реле.
9. Що таке запобіжники? Які існують види запобіжників?
10. Опишіть конструкцію та принцип дії плавкого запобіжника.

### **Список літератури для вивчення теми 8**

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / В.І.Мілих, О.О.Шавьолкін. За ред. В.І.Мілих. – К.: Каравелла, 2007. – 688 с.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / Будіщев М.С. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
3. Паначевний Б.І. Загальна електротехніка: теорія і практикум / Б.І. Паначевний, Ю.Ф. Свєргун. – Київ: Каравела, 2003. – 440 с.
4. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: Навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.

## Лекція 14

### ТЕМА 9 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ

#### План лекції

- 9.1 Предмет електроніки
- 9.2 Напівпровідникові резистори та діоди
- 9.3 Транзистори: біполярні, польові
- 9.4 Тиристори
- 9.5 Інтегральні мікросхеми та силові напівпровідникові модулі
- 9.6 Фотоелектричні прилади та тлумачення про оптоелектроніку

#### 9.1 Предмет електроніки

**Електроніка** – це галузь науки і техніки, що охоплює та вивчає використання електронних та іонних процесів, тобто процесів перетворення концентрації та пересування зарядів, що відбуваються у вакуумі, газах, твердих тілах та плазмі. Фізична електроніка займається вивченням цих явищ. Технічна (прикладна) електроніка розробляє теорію та практику використання відповідних приладів, пристроїв, систем та устаткування у різних областях діяльності людини – науці, промисловості (промислова електроніка), зв'язку та агропромисловому виробництві. Широке розповсюдження електронних приладів та пристроїв пояснюється їхніми унікальними властивостями у порівнянні з механічними, електромеханічними приладами, а саме, швидкодією, значною чутливістю до малих сигналів, відсутністю частин, що пересуваються, малими габаритами, високою надійністю. Це пов'язано з тим, що «пересувними» елементами цих приладів є електрони та іони, які мають найменші можливі маси. Електронна апаратура універсальна та гнучка, а параметри вузлів приладів та пристроїв легко налагоджувати для різних умов роботи.

Промислові електронні прилади поділяються на:

- енергетичні прилади, які призначені для отримання, перетворення та передавання електричної енергії;



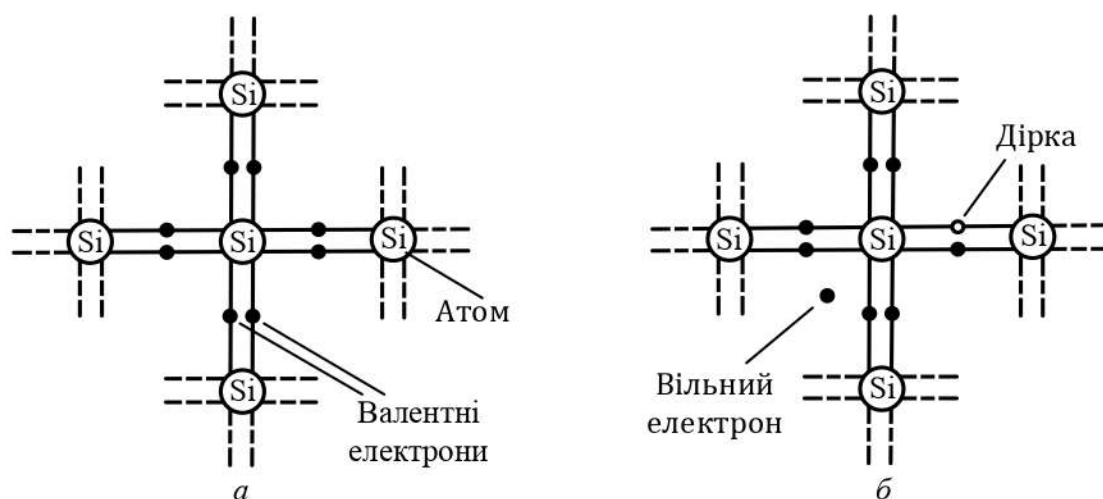
- технологічні прилади, які призначені для безпосереднього впливу потоків часток або електромагнітних кіл на речовини з метою обробки матеріалів та виробів;
- інформаційні прилади, які призначені для збирання та опрацювання інформації з метою впливу на технологічні машини та процеси.

При цьому розрізняють:

- *аналогові інформаційні пристрої*, що опрацюють аналогові електричні сигнали, закон змінювання яких повторює закон змінювання відповідного технологічного параметра;
- *дискретні інформаційні прилади*, що опрацюють імпульсні електричні сигнали. Різновидом таких приладів є *цифрові інформаційні прилади*. В таких приладах безперервна технологічна інформація перетворюється у відповідний порядок цифр – сигналів (кодування), які потім опрацюються у цифровому вигляді, на підставі чого утворюються відповідні команди.

Основу сучасної промислової електроніки складають напівпровідникові прилади на базі *напівпровідникових матеріалів* – кремнію та германію. Ці два елемента – чотиривалентні, тобто на зовнішній орбіті їх атомів перебувають по чотири електрони. Кристали кремнію та германія мають дуже стійку структуру, завдяки якій атоми знаходяться разом у стійкому стані, який забезпечується ковалентним зв'язком. Відомо, що при наявності у атома восьми валентних електронів речовина є дуже стабільною, наприклад, інертні гази перебувають у такому стані. Сусідні атоми в кристалі кремнію або германія беруть спільну участь у такому стані, у результаті чого кожне ядро має «половинну частку», у восьми валентних електронах замість індивідуального володіння чотирма валентними електронами, які мав би ізольований атом.

Така структура з атомів кремнію схематично показана на рисунку 9.1, *a*. Кожен із зазначених на рисунку зв'язків між атомами – це валентний електрон, який використовується спільно.



*a* - площинна схема; *б* - решітка з вільним електроном та діркою

Рисунок 9.1 – Кристалічна решітка кремнію

При кімнатній температурі внаслідок теплових коливань атомів відбувається розрив деяких зв'язків кристалічної решітки, електрони відриваються від атомів та вільно блукають по кристалу. Там, де електрон стає вільним, він залишає після себе *дірку* або відсутність негативного заряду, яка також може переміщуватися, якщо розірваний зв'язок заповнюється електроном із сусіднього атома. На рисунку 9.1- *площинна схема; б - решітка з вільним електроном та діркою*

*Рисунок* , *б* наведена ділянка кристалічної решітки кремнію при кімнатній температурі з вільним електроном та діркою, що їй вийшла.

Наявність вільних електронів робить кремній провідником електрики, хоча й дуже поганим. Дуже слабка провідність, яку має чистий напівпровідник, має назву **власна провідність**. Додавання домішок у напівпровідник приводить появи нових властивостей.

На рисунку 9.2 показаний результат введення п'ятивалентних атомів фосфору в кристал кремнію. Чотири з п'ятивалентних електронів пов'язані із сусідніми атомами кремнію, а електрон, що залишився, настільки слабо зв'язаний, що стає вільним і може пересуватися по кристалу, збільшуючи його провідність. Введення домішок у напівпровідник має назву *легування*, а провідність, що з'являється при цьому – **домішкова провідність**.

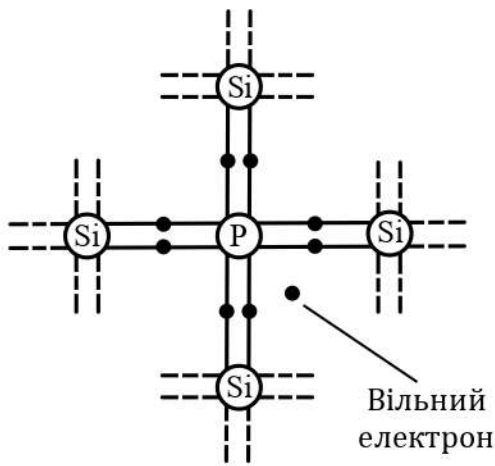


Рисунок 9.2 –  
Напівпровідник *n*-типу

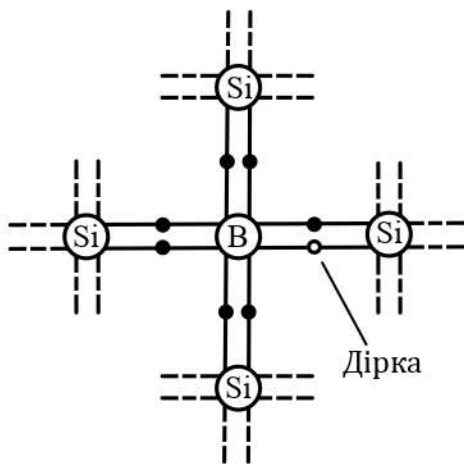


Рисунок 9.3 –  
Напівпровідник *p*-типу

П'ятивалентні домішки, такі як фосфор – це *донорні домішки*, тому що вони додають вільні електрони в кристал. Оскільки домішкова провідність у цьому випадку обумовлена вільними негативними зарядами (електронами), цей тип легованих напівпровідників має назву напівпровідники *n*-типу.

На рисунку 9.3 наведений ефект від введення в кремній тривалентних атомів бору. Незважаючи на те, що атом бору має тільки тривалентні електрони, він приймає додатковий електрон від одного із сусідніх атомів кремнію для заповнення його ковалентних зв'язків. Це приводить до утворення в решітці дірки або відсутності електрона, і така дірка може переміщатися, беручи участь, таким чином, у забезпеченні провідності. При цьому відбуваються перескоки валентних електронів, але результат – це перехід дірки від атома до атома. Тривалентні домішки,

подібні бору – це **акцептори**. Провідність обумовлена позитивними дірками, тому легований напівпровідник є напівпровідник *p*-типу.

Робота напівпровідникового приладу визначається ефектами, що мають місце на границі між матеріалами *p*- та *n*-типу. Важливо зрозуміти, що напівпровідниковий перехід – це зміна матеріалу з *p*-типу на *n*-тип у межах однієї й тої ж безперервної кристалічної решітки.

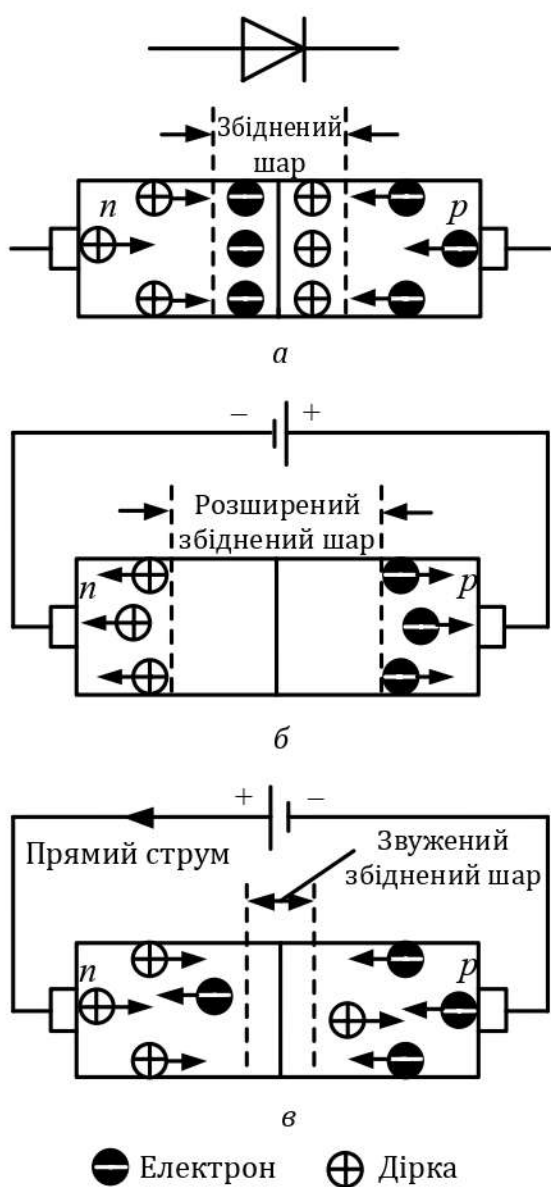


Рисунок 9.4 – Принцип  $p-n$ -переходу

На рисунку 9.4, *a* показаний  $p-n$ -перехід з металевими контактами з кожної сторони. Як тільки перехід утворений, частина вільних електронів з області  $n$ -типу поблизу границі переходить в область  $p$ -типу та заповнює частину дірок у  $p$ -області. На місці електронів залишається область з некомпенсованим позитивним зарядом. Те ж саме відбувається в області  $p$ -типу, де виникає негативний заряд. Ці заряди утворюють потенційний бар'єр, що перешкоджає подальшому переміщенню електронів через перехід, завдяки чому настає рівновага. У результаті такого початкового переміщення дірок і вільних електронів поблизу  $p-n$ -переходу практично не залишається вільних носіїв. Ця область, шириною менше одного мікрона, має назву *збіднений шар*.

На рисунку 9.4, *б*, наведений принцип  $p-n$ -переходу, якщо до нього прикладена зворотна напруга, при цьому клемка «+» джерела підключена до виводу  $p$ -типу, а клемка «-» – до виводу  $n$ -типу, то електричне поле буде переміщати вільні заряди в обох областях від переходу. Це призведе до збільшення збідненого шару. Струм через  $p-n$ -перехід протікати майже не буде. На рисунку 9.4, *в*,

наведений принцип  $p-n$ -переходу, якщо до нього прикладена пряма напруга, при цьому клемка «+» джерела підключена до виводу  $n$ -типу, а клемка «-» – до виводу  $p$ -типу, то електричне поле буде направляти вільні заряди як в область  $p$ -типу, так і в область  $n$ -типу до переходу. Це призведе до зменшення збіднено-

го шару, і навіть його повного зникнення. Електрони з  $n$ -області та дірки  $p$ -області будуть здатні перетнути  $p$ - $n$ -перехід. В колі почне протікати суттєвий струм, що має назву **прямий струм**.

Таким чином, головною властивістю  $p$ - $n$ -переходу є здатність при прямій прикладеній напрузі проводити електричний струм в одному напрямку (бути провідником), а при прикладені зворотної напруги практично не проводити електричний струм (бути ізолятором).

## 9.2 Напівпровідникові резистори та діоди

**Напівпровідникові резистори** – це напівпровідникові прилади з двома виводами з однорідного напівпровідника без  $p$ - $n$ -переходу.

**Лінійний резистор** має постійний опір з лінійною вольт-амперною характеристикою, виготовляється за слабологованих матеріалів (арсенід галію). Інші резистори є нелінійними, різноманітність їхніх властивостей визначається особливою чутливістю напівпровідникових матеріалів до впливу світла, температури, електричних та магнітних полів. На рисунку 9.5 наведено графічне зображення лінійного резистора на схемах електричних принципів.

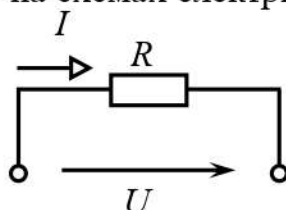


Рисунок 9.5 – Графічне позначення напівпровідникового лінійного резистора

**Терморезистор** – це напівпровідниковий прилад, опір якого залежить від температури. Розрізняють терморезистори прямого нагрівання: нагрівання здійснюється безпосередньо середовищем або струмом, що проходить через терморезистор, і терморезистор непрямого нагрівання: нагрівання здійснюється спеціальним нагрівачем. В залежності від температурної характеристики розрізняють *термістори* та *позистори* з негативним і позитивним температурним коефіцієнтом опору відповідно. Терморезистори використовують в системах регулювання температури, теплового захисту та протипожежної сигналізації.

На рисунку 9.6 наведено графічне зображення терморезистора на схемах електричних принципів.

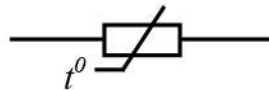


Рисунок 9.6 – Графічне позначення напівпровідникового терморезистора

**Варистор** - це напівпровідниковий прилад, опір якого залежить від прикладеної до нього напруги, та який використовується в стабілізаторах, у пристроях захисту приладів та елементів кіл від перенапруги, у системах контролю та автоматичного регулювання. На рисунку 9.7 наведено графічне зображення варистора схемах електричних принципів.

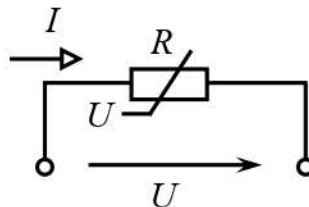


Рисунок 9.7 – Графічне позначення напівпровідникового варистора

**Фоторезистор** – це напівпровідниковий прилад, опір якого залежить від освітленості. За відсутністю освітлення фоторезистор має максимальний опір, який має назву темновий. У сукупності з джерелом оптичного випромінювання фоторезистори використовуються для контролю та рахунку предметів у системах передавання і опрацювання інформації. На рисунку 9.8 наведено графічне зображення фоторезистора схемах електричних принципів.

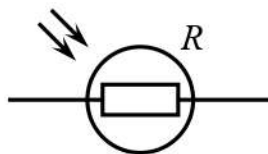


Рисунок 9.8 – Графічне позначення напівпровідникового фоторезистора

**Тензорезистор** – це напівпровідниковий прилад, у якому використовується залежність електричного опору від механічних деформацій. Тензорезистори наклеюються на елементи, деформацію яких необхідно виміряти, та застосовуються в приладах для контролю механічних напружень, у вузлах машин, у приладах для вимірювання зусиль у балках та моментів кручення у валах. На

рисунку 9.9 наведено графічне зображення тензорезистора схемах електричних принципів.

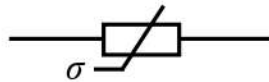


Рисунок 9.9 – Графічне позначення напівпровідникового тензорезистора

**Напівпровідниковий діод** - це напівпровідниковий прилад з одним  $p-n$ -переходом і двома зовнішніми виводами: анод (А) та катод (К). Електрод діода, який підключений до позитивного полюса джерела струму (область  $p$ ), коли діод відкритий, тобто має малий опір, має назву **анод**, а електрод, який підключений до негативного полюса (область  $n$ ), має назву **катод** – рисунок 9.10, б.

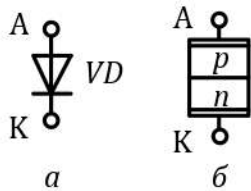


Рисунок 9.10 –

Умовне позначення діода (а), його структура (б)

Найбільше застосування отримати германієві та кремнієві напівпровідникові діоди, а також діоди, що виконані на основі арсеніду галію.

Вольт-амперна характеристика діода показана на рисунку 9.11.

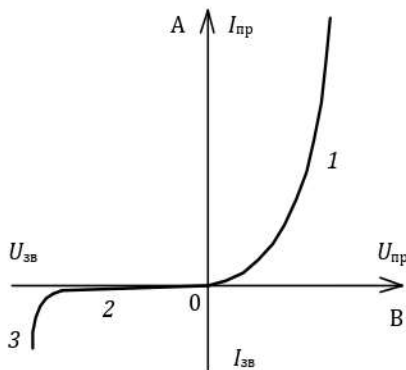


Рисунок 9.11 – Вольт-амперна характеристика діода

Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода має три характерних ділянки:

1 – **робота при прямій напрузі**: протікає прямий струм,  $p-n$ -перехід відкритий, і сила струму обмежена тільки опором матеріалу напівпровідника;

2 – **робота при зворотній напрузі**: протікає зворотний струм,  $p-n$ -перехід

закритий, і струм незначної сили проходить за рахунок незначної кількості не основних носіїв вільних зарядів у матеріалі напівпровідника;

3 – **робота при напрузі пробою**: зворотний струм різко збільшується, відбувається різке, («лавиноподібне») збільшення не основних носіїв вільних зарядів у



матеріалі напівпровідника при збільшенні зворотної напруги, в більшості випадків відбувається руйнування пристрою.

Кремнієві діоди здатні працювати при температурі від мінус  $60^{\circ}\text{C}$  до плюс  $150^{\circ}\text{C}$ , германієві - при температурі від мінус  $60^{\circ}\text{C}$  до плюс  $85^{\circ}\text{C}$ . Для одержання більшої зворотної напруги діоди з'єднують послідовно, а для одержання більшого прямого струму діоди з'єднують паралельно.

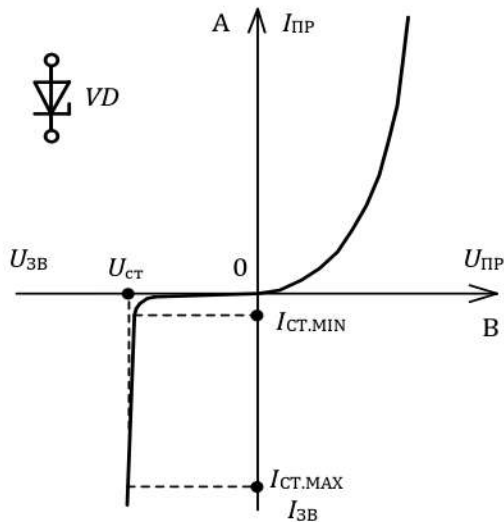


Рисунок 9.12 –  
Умове позначення та вольт-амперна характеристика стабілітрона

**Стабілітрон** – це різновид діодів, який у порівнянні зі звичайними діодами має досить низьку регламентовану напругу пробою (при зворотному включенні) і може підтримувати цю напругу на постійному рівні при значній зміні сили зворотного струму. Умове графічне позначення стабілітрона та його вольт-амперна характеристика приведені на рисунку 9.12. Відмінною рисою стабілітрона є наявність у зворотній гілці ВАХ області електричного пробою *p-n*-переходу, на якій напруга на діоді практично не міняється, що дозволяє використовувати діод для стабілізації напруги.

На рисунку 9.13 приведена схема стабілізатора напруги, який побудований на базі стабілітрона.

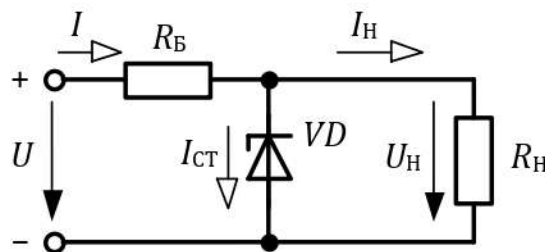


Рисунок 9.13 – Стабілізатор напруги

Вхідна напруга  $U$  розподіляється між баластним резистором  $R_B$  та паралельно включеними стабілітроном  $VD$  і резистором навантаження  $R_H$ . При збіль-



шенні вхідної напруги  $U$  напруга на стабілітроні  $VD$  залишається незмінною, але зростає струм стабілізації  $I_{CT}$ . Це приводить до відповідного зростання падіння напруги на баластному резисторі  $R_B$ . Напруга на навантаженні залишається на необхідному рівні.

### 9.3 Транзистори: біполярні, польові

**Транзистор** – це напівпровідниковий прилад, із трьома електродами, і призначений для підсилення або генерації електричних сигналів, а також для комутації електричних кіл. Транзистори розподіляються на біполярні і польові (уніполярні).

**Біполярний транзистор** – це напівпровідниковий прилад, із трьома електродами, один з яких служить для керування струмом між двома іншими. Умовні графічні позначення біполярних транзисторів  $p-n-p$ - та  $n-p-n$ -типів відповідно наведені на рисунку 9.14.

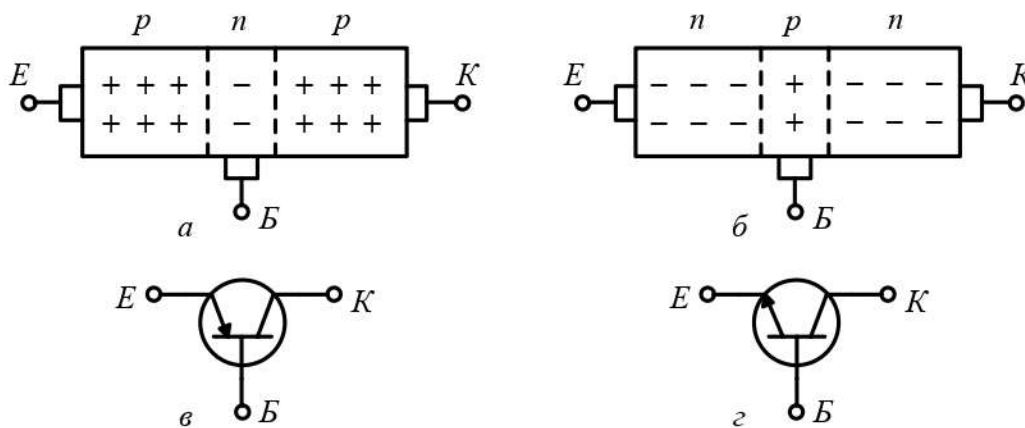


Рисунок 9.14 – Структури (а, в) та умовні графічні позначення (б, г) біполярних транзисторів  $p-n-p$ - та  $n-p-n$ -типів відповідно

Область, що є джерелом носіїв зарядів (електронів і дірок), має назву **емітер** ( $E$ ). Область, що приймає заряди від емітера, має назву **колектор** ( $K$ ). Середня область між ними – це **база** ( $B$ ). Літерне позначення транзисторів  $VT$  (вентиль транзисторний).

Принцип дії транзисторів  $n-p-n$ -типу та  $p-n-p$ -типу та фізичні процеси, що відбуваються в них ідентичні. Для прикладу розглянемо  $n-p-n$ -транзистор, усі

міркування повторюються абсолютно аналогічно для випадку  $p-n-p$ -транзистора, із заміною слова «електрони» на «дірки», і навпаки, а також із заміною всіх напруг на протилежні за знаком.

Розглянемо ситуацію, при якій на переходи транзистора від зовнішніх джерел живлення подаються постійні напруги  $U_{EB}$  та  $U_{KB}$  - рисунок 9.15. Напруги  $U_{EB} < 0$  та  $U_{KB} > 0$  забезпечують відкритий стан емітерного переходу  $\Pi_E$  та закритий стан колекторного переходу  $\Pi_K$ , що відповідає активному режиму роботи транзистора.

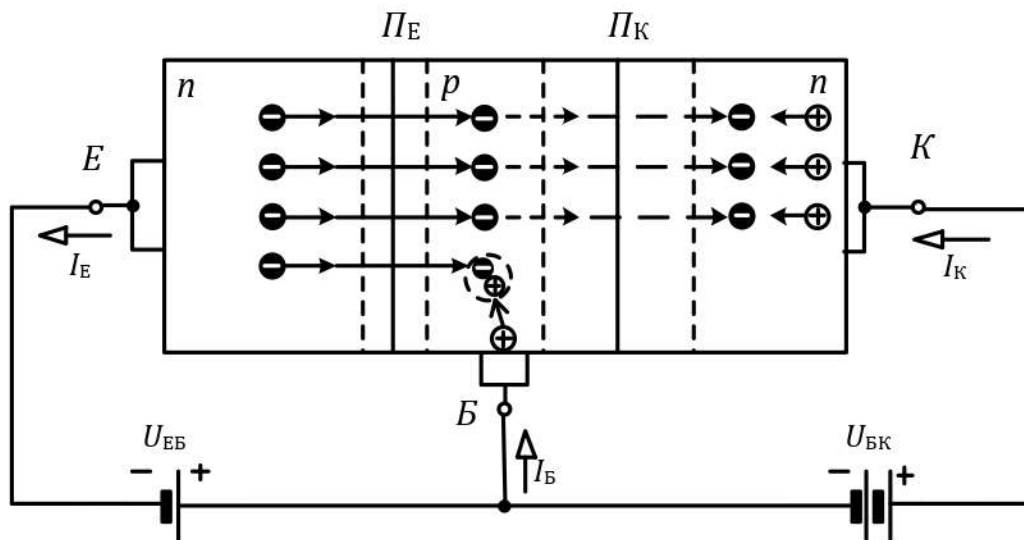


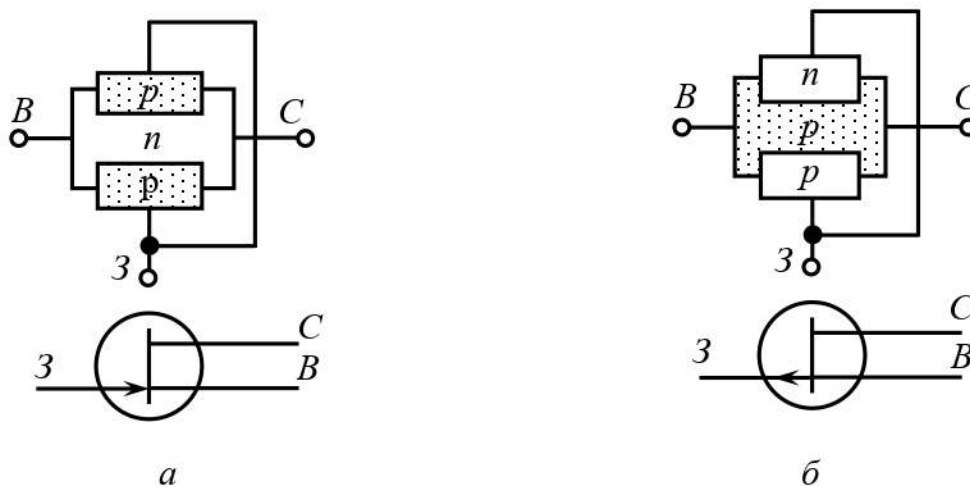
Рисунок 9.15 – Принцип дії біполярного транзистора  $n-p-n$ -типу

Через відкритий емітерний перехід  $\Pi_E$  протікають основні носії заряду – електрони, які потрапляють в базу, частково рекомбінуються з її дірками, але внаслідок того, що база виконується слабо легованою (містить невелику кількість домішок) переважна більшість електронів залишаються невірноваженими та надлишковими. Електрони нагромаджуються в досить тонкій базі та виштовхуються до колекторного переходу  $\Pi_K$ . Електрони є неосновними носіями заряду в базі, тому прикладена до колекторного переходу  $\Pi_K$  напруга не перешкоджає проході електронів через нього, а навпаки втягує електрони до колектора. Таким чином, в активному режимі всю структуру транзистора від емітера до колектора пронизує наскрізний потік електронів, що створює в зовнішніх колах емітера та колектора струми  $I_E$  та  $I_K$ , спрямовані назустріч руху електро-

нів. Важливо підкреслити, що цей потік електронів  $i$ , відповідно, струм колектора  $I_K$ , що є вихідним струмом транзистора, дуже ефективно управляються вхідною напругою  $U_{EB}$  та не залежать від вихідної напруги  $U_{KB}$ . Струм колектора  $I_K$  практично дорівнює струму емітера  $I_E$ , за винятком невеликої втрати на рекомбінацію в базі, яка й утворює струм бази  $I_B$ .

Таким чином, біполярний транзистор можна розглядати як пристрій, що керує електричним струмом, що протікає через емітер до колектора за допомогою струму бази. Ця властивість транзистора використовується для підсилення електричного сигналу.

**Польові (уніполярні) транзистори** – це прилади, струм крізь які обумовлений пересуванням носіїв заряду тільки одного знаку та керується поперечним електричним полем. Канал – це область польового транзистора, в якій регулюється струм транзистора з каналом  $n$ -типу (рисунок 9.16.а) та за каналом  $p$ -типу (рисунок 9.16.б).



*a* – з каналом  $n$ -типу; *б* – з каналом  $p$ -типу

Рисунок 9.16 – Структура і умовні позначення польового транзистора

Область каналу, від якої починається пересування основних носіїв має назву виток ( $B$ ), а область, до якої вони пересуваються – **сток** ( $C$ ), область, що керує та охоплює канал, має назву **затвор** ( $З$ ). Стрілка в позначенні затвора спрямована від слою  $p$  до  $n$  і дозволяє встановити тип приладу. Слід відзначити, що польовий транзистор керується зворотною для  $p$ - $n$  переходу напругою, тоб-

то електричним полем, тому і назва транзисторів – **польові**. Високий опір і малий вхідний струм – це важливі переваги таких транзисторів, що дозволяють їм працювати з менш потужними джерелами вхідних сигналів, ніж це можливо для біполярних транзисторів. Вихідна потужність польових транзисторів менша, ніж у біполярних транзисторів.

## 9.4 Тиристри

**Тиристор** – це перемикаючі напівпровідникові прилади з трьома і більше  $p-n$  переходами, головним застосуванням яких є безконтактна комутація електричних кіл. Триелектродний тиристор – **триністор**, складається з чотирьох областей кристала напівпровідника  $p-n-p-n$ , що чергуються, та з трьома  $p-n$  переходами. Має три виводи: потужні анод (А) і катод (К) і малопотужний керувальний електрод (КЕ).

Позначення триністора на принципових схемах показано на рисунку 9.17, а літерне позначення на схемах – *VS*.

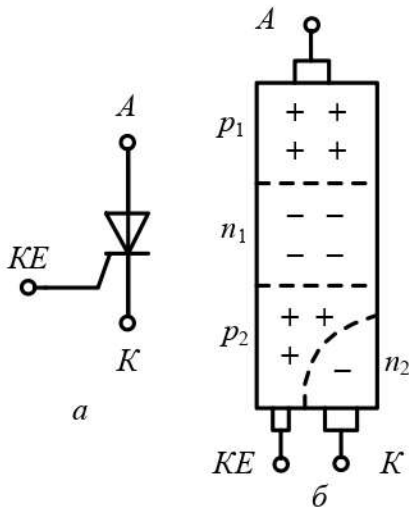


Рисунок 9.17 – Умовне позначення тиристора (а), його структура (б)

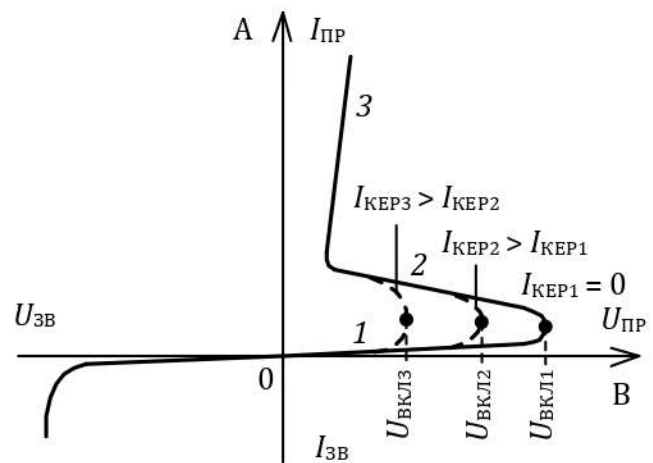


Рисунок 9.18 – Вольт-амперна характеристика тиристора

Розглянемо принцип дії тиристора за його вольт-амперної характеристикою (див. рисунок 9.18). При подачі до тиристора прямої напруги він знаходиться в закритому стані (ділянка 1) – струм через діод практично відсутній, вся напруга прикладена до кола втрачається на тиристорі. При досягненні на-

пругою на тиристорі значення напруги включення  $U_{\text{ВКЛ}}$  тиристор відкривається – через нього починає протікати струм, падіння напруги зменшується. Ділянка 2 є не перехідною з закритого стану тиристора в відкритий. Після повного відкриття (ділянка 3) тиристор працює як звичайний діод при прямому включенні. Закривається тиристор при знятті струму через нього. При подачі струму на електрод керування тиристора зменшується напруга включення  $U_{\text{ВКЛ}}$ . При чому, чим більше струм керування  $I_{\text{КЕР}}$ , тим менше напруга включення  $U_{\text{ВКЛ}}$ .

До класу тиристорів належать наступні напівпровідникові прилади:

- **диністори**, які відрізняються від розглянутих вище тиристорів відсутністю керуючого електрода та застосовуються для перемикання кіл із досягненням напруги  $U_{\text{ПЕР}}$  – рисунок 9.19



Рисунок 9.19 – Графічне позначення диністора

- **симетричний тиристор – симистор** – це подвійний тиристор, який може керувати струмом обох напрямків, а також однаково працює з різними полярностями прикладених напруг. За конструкцією симистор – це поєднані в одному кристалі дві зустрічно ввімкнені тиристорні структури – рисунок 9.20;

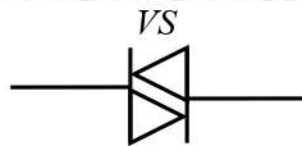


Рисунок 9.20 – Графічне позначення симистора

- **тиристори, що вмикаються за керувальним електродом** – це прилади, які на відміну від звичайних тиристорів можна вмикати подаванням негативних імпульсів струму за колом керування - рисунок 9.21.

Конструктивно відрізняються більш великою площиною керувального електроду. Процес вмикання аналогічний вмиканню звичайного тиристора, вмикання здійснюється подаванням негативного імпульсу керування.

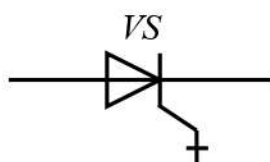


Рисунок 9.21 – Графічне позначення тиристора, що вмикається за керувальним електродом

## 9.5 Інтегральні мікросхеми та силові напівпровідникові модулі

Інтенсивний розвиток електроніки, широке використання засобів обчислювальної техніки практично в усіх сферах діяльності були б неможливими без мікромініатюризації та інтеграції електронних схем. Основним конструктивно-технічним принципом є поєднання (інтеграція) в одному складному мініатюрному елементі багатьох простих елементів – діодів, транзисторів, резисторів. В результаті такого поєднання складний мікроелемент є *інтегральна мікросхема*.

**Інтегральна мікросхема (ІМС)** – це сукупність транзисторів, діодів, резисторів і конденсаторів, що складають завершену електронну схему для виконання окремої функції перетворення електричних сигналів, виготовлену в спільному корпусі під час єдиного технологічного процесу. За технологією виготовлення ІМС бувають: напівпровідникові, гібридні, сумісні та плівкові.

Розглянемо особливості їхньої реалізації на прикладі напівпровідникової ІМС, що має резистор, транзистор і конденсатор. У напівпровідникових ІМС усі елементи та міжелементні зв'язки виконуються в об'ємі та на поверхні напівпровідникової основи. В ролі ізоляції між елементами використовують електронно-дірковий перехід, зсунений у зворотному напрямі, та діелектричну ізоляцію ( $SiO_2$ ). Міжелементні зв'язки здійснюються струмопровідними доріжками на окисненій поверхні напівпровідника методом вакуумного напилювання металу (алюмінію, золота). Резистор – це тонка стрічка  $p$ -типу, з обох кінців якої є металеві контакти. У якості конденсаторів в ІМС використовують ємність збідненого прошарку зворотного-зсуненого  $p-n$  переходу. Особливістю ІМС є відсутність серед цих елементів котушок індуктивності, що полягає у використанні зовнішніх індуктивностей. Для захисту від впливу зовнішніх факторів і

механічних пошкоджень ІМС має корпус з виводами для підключення (від 8 до 48). Використовують корпуси таких типів: циліндричний металоскляний і плоскі металокерамічний, пластмасовий або керамічний.

Складність ІМС прийнято характеризувати ступенем інтеграції, який визначається кількістю елементів, що в ній містяться. ІМС обсягом від 101 до 1000 елементів має назву ІМС третього ступеня інтеграції; від 1001 до 10000 – четвертого, від 10001 до 100000 – п'ятого ступеня інтеграції. Для характеристики ІМС використовують показник щільності пакування – це кількість елементів на одиницю площини. Цей показник характеризує рівень технології та складає від 500 до 1000 елементів на  $1 \text{ мм}^2$ . Промисловістю випускається велика кількість різних за функціональним призначенням ІМС: від простих діодних до транзисторних збірок до однокристалічних мікро-ЕОМ, які умовно можна розділити на два великі класи: аналогові та цифрові.

Найбільшого поширення набули силові напівпровідникові модулі, які за конструкцією є сполучення поєднаних в одному корпусі декількох силових напівпровідникових приладів. Металева пластина – це основа модулю, ізолювана від струмопровідних частин і призначена для тепловідведення на зовнішній охолоджувач. Останній може бути спільним для декількох модулів, що значно спрощує конструкцію пристрою. Сам модуль герметизований в пластмасовому корпусі, що виконаний на металевій пластині і має виводи для підключення до зовнішніх електричних кіл. Перспективним напрямком є використання силових інтелектуальних модулів, які поряд з силовою схемою влаштований захист від перевантажень за струмом і температурою, забезпечують функцію захисту від перенапруги, мають властивість впродовж досить тривалого часу слідкувати за процесами короткого перемикування в схемі, обмежувати темп зростання температури і напруги. Вхідні кола, як правило, ізолювані від силових кіл.

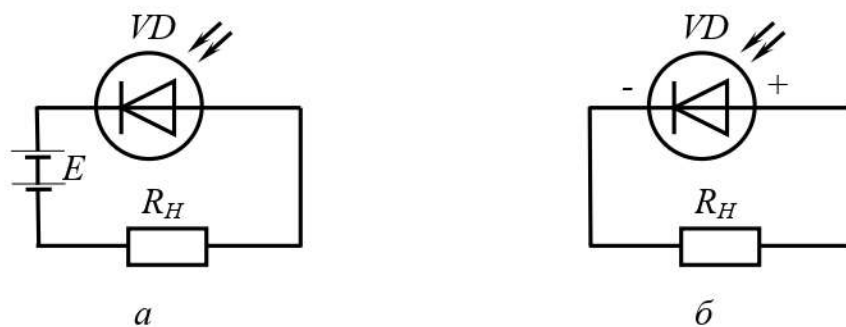


## 9.6 Фотоелектричні прилади та тлумачення про оптоелектроніку

До фотоелектричних приладів належать фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристри, світлодіоди, оптрони, оптоелектронні пари, волокняний світлодіод, оптичні компакт-диски.

**Фоторезистор** – це напівпровідниковий прилад з внутрішнім фотоефектом, електричний опір якого змінюється під впливом оптичного випромінювання. Фоторезистор вмикається в коло джерела ЕРС послідовно з опором навантаження, а за відсутністю освітлення має максимальний опір, який має назву темновий. Реєстрацією струму у колі або напруги можна контролювати (вимірювати) освітленість поверхонь. У сукупності з джерелом оптичного випромінювання фоторезистори широко використовуються для контролю та рахування предметів у системах передавання і опрацьовування інформації.

**Фотодіод** – це напівпровідниковий прилад з внутрішнім фотоефектом, що має один *p-n*- перехід і два виводи, та який працює у двох режимах: без зовнішнього джерела електричної енергії (режим фотогенератора) – рисунок 9.22.а, та із зовнішнім джерелом енергії (режим фотоперетворювача) – рисунок 9.22.б.



а - режим фотогенератора; б - режим фотоперетворювача

Рисунок 9.22 – Режимы работы фотодіода

Фотодіоди в режимі фотогенератора широко використовують в ролі джерел – сонячних батарей для перетворення енергії сонячних променів в електричну.

**Фототиристор** – це тиристор, напруга вмикання якого зменшується із збільшенням освітлюваності, який є аналогом керованого тиристора, вмикання



якого можна виконати імпульсом світла. Широко використовуються в схемах автоматики в ролі керованих світлом ключових елементів – реле, а також у силовій техніці, де їх використання спрощує вирішення питання електричної ізоляції керування від силових кіл високої напруги, що комутуються.

**Світлодіод** – це випромінювальний напівпровідниковий прилад, у якому при наявності прямого струму відбувається світіння зони  $p-n$ - переходу. Чим більше струм, тим більше світіння. На рисунку 9.23 наведена схема вмикання світлодіода. На основі світлодіодів та їхніх збірок (матриць) утворюються різні індикаторні прилади – пристрої для візуального відображення інформації від простого, де сяйво є свідомством про стан об'єкта, до літерно-цифрових і матричних дисплеїв у цифрових системах опрацювання інформації.

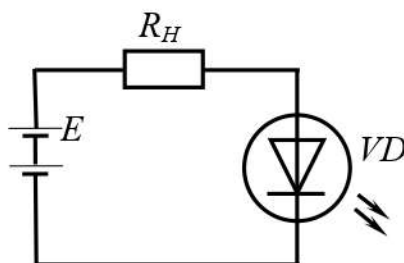


Рисунок 9.23 – Схема вмикання світлодіода

На основі над яскравих світлодіодів створені енергозберігаючі лампи з терміном служби 50 тис. годин (до 10 років) та кольоровим світінням: білим, зеленим, та блакитним.

**Оптрони** – це прилади, що містять випромінювач світла 1, світлодіод 2, фотоприймач 3, які взаємодіють один з одним і розташовані в одному корпусі – рисунок 9.24.

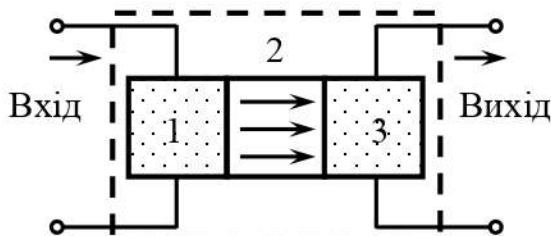
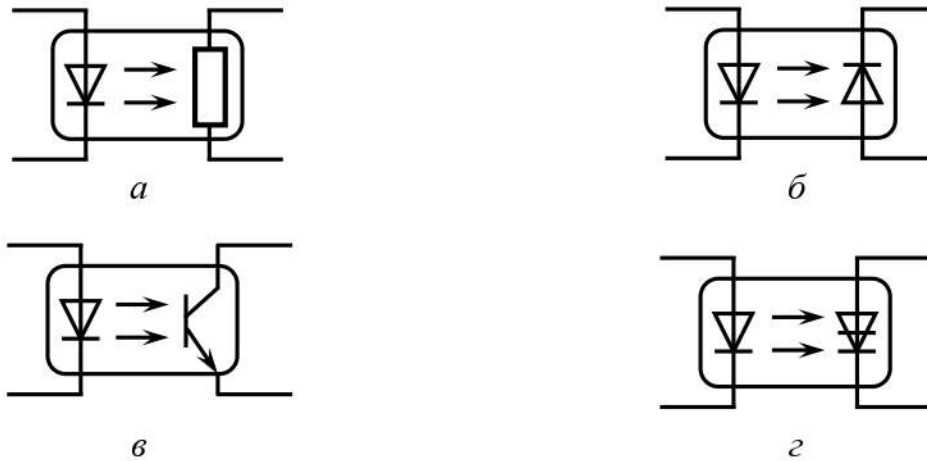


Рисунок 9.24 - Оптрон

У цьому випадку сигнал з одного електричного кола (випромінювача) передається в друге електричне коло (приймача) при відсутності між ними електричного зв'язку – **гальванічна розв'язка**. В залежності від типу фотоприймача оптрони класифікують: резисторні, діодні, транзисторні та тиристорні – рисунок 9.25.



*a* – резисторного; *б* – діодного; *в* – транзисторного; *г* - тиристорного

Рисунок 9.25 – Умовні позначення оптронів

Найбільш універсальні діодні оптрони використовують для гальванічної розв'язки швидкодіючих цифрових пристроїв. Транзисторні і тиристорні оптрони широко використовують як безконтактні комутатори силових кіл, а резисторні оптрони – в лінійних радіотехнічних колах.

## Лекція 15

### ТЕМА 9. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ

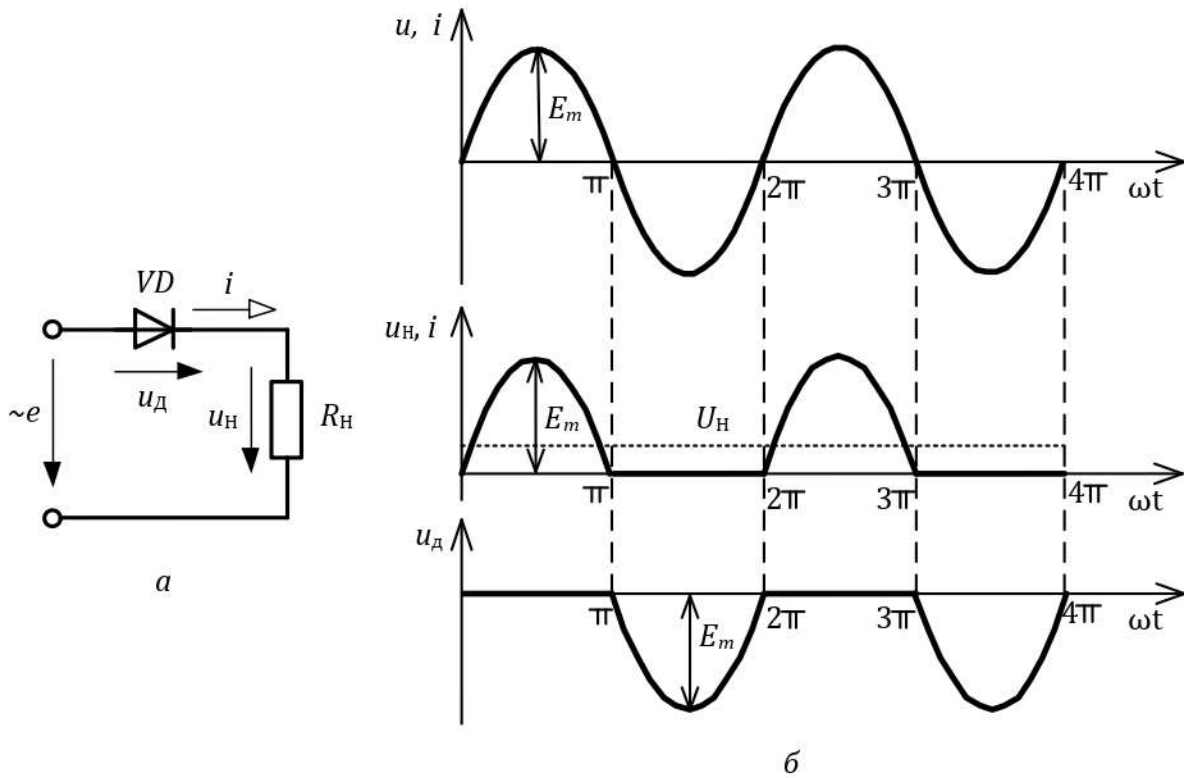
#### План лекції

- 9.7 Випрямлячі та пристрої перетворювальної техніки
- 9.8 Електронні підсилювачі та генератори
- 9.9 Дискретні електронні пристрої
- 9.10 Мікропроцесорна техніка: мікроконтролери, пристрої пам'яті, функціонування інтерфейсу

#### 9.7 Випрямлячі та пристрої перетворювальної техніки

**Випрямляч** – це пристрій, який призначений для перетворення електричної енергії джерела змінного струму в електричну енергію постійного струму. Таке перетворення необхідне в тому випадку, коли первинним джерелом електроенергії є однофазна (трифазна) мережа або автономний генератор змінного струму, а споживач електроенергії працює на постійному струмі. Принцип дії будь-якого випрямляча заснований на одnobічній провідності діодів, що перетворюють змінний струм у пульсуючий струм постійного напрямку.

Розглянемо однофазний однонапівперіодний випрямляч, який містить один діод  $VD$ , включений у коло вторинної обмотки трансформатора  $T$  послідовно з навантаженням  $R_H$  - рисунок 9.26, *а*. Часові діаграми напруг і струмів, що пояснюють роботу випрямляча наведені на рисунку 9.25, *б*. У перший напівперіод напруги на вході  $u = U_m \sin \omega t$ , коли вона позитивна, діод  $VD$  відкритий, тому що на його аноді діє позитивний потенціал. На цьому інтервалі часу ( $0 - T/2$ ) через навантаження буде протікати струм  $i = \frac{U_m}{R_H} \sin \omega t$ , що є для діода прямим струмом. При цьому  $u_d = 0$ ,  $u_H = u = U_m \sin \omega t$ . На другому напівперіоді напруга  $u$  стає негативною, діод закривається під дією негативного потенціалу на аноді діода.

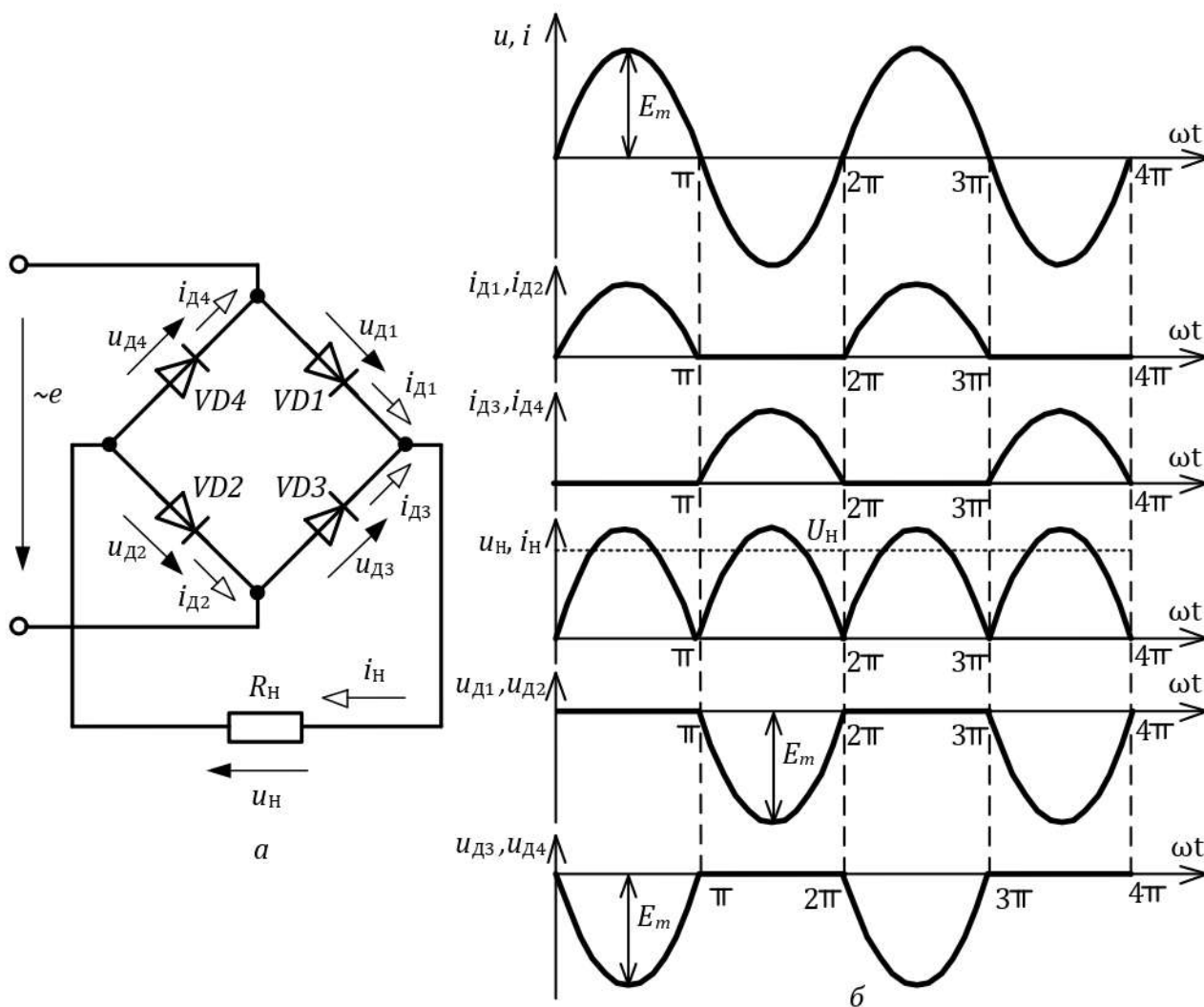


*a* - однонапівперіодна схема; *б* - часові діаграми напруг і струмів

Рисунок 9.26 – Однофазний випрямляч

На цьому інтервалі часу  $(T/2 - T)$   $i_H = 0$ ,  $u_H = 0$ , напруга на діоді  $u_D = u = U_m \sin \omega t$  буде зворотною напругою діода. У результаті такої роботи випрямляча струм через навантаження буде протікати протягом тільки одного напівперіоду змінної напруги  $u$  і викликати на навантаженні періодичну несинусоїдну напругу  $u_H$ . Недоліками однонапівперіодного випрямляча є великий рівень пульсацій випрямленої напруги, змушене намагнічування сердечника трансформатора за рахунок постійної складової струму вторинної обмотки, погане використання трансформатора, низькі коефіцієнти використання діодів, малий к.к.д. випрямляча. Однонапівперіодні випрямлячі застосовуються для живлення малопотужних підсилювачів, електронно-променевих трубок і у високовольтних установках для випробування ізоляції.

Розглянемо однофазний двонапівперіодний мостовий випрямляч, який містить чотири діоди, які включені за мостовою схемою – рисунок 9.27.



*a* - двонапівперіодна мостова схема; *б* - часові діаграми напруг і струмів

Рисунок 9.27 – Мостовий випрямляч

До однієї діагоналі моста подана змінна напруга  $u = U_m \sin \omega t$ , до іншої – підключене навантаження  $R_H$ . У перший напівперіод напруги  $u$ , коли потенціал на аноді  $VD1$  позитивний, діоди  $VD1$  та  $VD2$  відкриті, а струм навантаження протікає через  $VD1$ ,  $R_H$  і  $VD2$ . У цьому інтервалі часу  $u_H = u = U_m \sin \omega t$ , діоди  $VD3$  і  $VD4$  закриті та перебувають під зворотною напругою. На другому напівперіоді напруга  $u$  стає негативною, діоди  $VD1$  і  $VD2$  будуть тепер у закритому стані перебувати під зворотною напругою, а діоди  $VD3$  і  $VD4$  – відкриті. Струм  $i_H$  буде протікати через  $VD2$ ,  $VD4$  та через навантаження  $R_H$  у тому ж напрямку, що й у попередній напівперіод. У результаті такої попарної роботи діодів струм у навантаженні буде протікати протягом двох напівперіодів і викликати напругу

гу  $U_H = 0,9 \cdot U$ . Двонапівперіодний випрямляч у порівнянні з однонапівперіодним має наступні переваги: випрямлені струм та напруга вдвічі більші, значно менший рівень пульсацій напруги, діоди вибираються за половиною струму навантаження, добре використовується трансформатор і відсутнє змушене підмагнічування його сердечника. Мостова схема має переважне застосування у випрямлячах невеликої та середньої потужності.

**Перетворювальна техніка** – це пристрої енергетичної (силової) електроніки, які знайшли широке використання для перетворення параметрів електричної енергії і регулювання надходження її від джерела до споживача. До таких пристроїв належать: некеровані випрямлячі, однофазний однонапівперіодний випрямляч, однофазний двонапівперіодний випрямляч, однофазний мостовий випрямляч, трифазні випрямлячі, згладжувальні фільтри, стабілізатор постійної напруги, керовані випрямлячі, перетворювачі напруги, автономні інвертори, перетворювачі частоти.

**Згладжувальні фільтри** призначені для пропускання постійної складової випрямленої напруги з максимальним послабленням змінної її складової – див. таблицю 9.1. Дія фільтрів заснована на використанні в колі реактивних індуктивного та ємнісного елементів, що здатні при вмиканні до джерела накопичувати енергію та віддавати її в навантаження із зменшенням надходженням енергії від джерела.

Схема однофазного однонапівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром наведена в таблиці 9.1.

Для поліпшення згладжування використовуються комбіновані LC (RC) – фільтри, схеми яких також наведені в таблиці 9.1. Вибір схеми визначається величиною випрямленого струму і допустимим значенням коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги. У ролі послідовних елементів фільтрів у колах з великим струмом використовуються індуктивності (дроселі), з малим струмом – резистивні елементи. Паралельними елементами фільтрів є конденсатори.

Дія індуктивного дроселя, як елемента фільтра, зведена до того, що в ньому витрачається найбільша частина змінної складової з частотою  $\omega$ , так як

його опір  $X_{L\phi} = \omega \cdot L$  звичайно більший за опір  $R_H$ . Дія конденсатора, як елемента фільтра, зведена до того, що він здійснює шунтування опору навантаження та пропускає крізь себе найбільшу частину змінної складової випрямленого струму.

**Стабілізатор постійної напруги** підтримує напругу на навантаженні з заданою точністю із зміною опору навантаження і напруги мережі у визначених межах. Існують два види стабілізаторів: параметричний та компенсаційний. Схема компенсаційного стабілізатора напруги наведена в таблиці 9.1. У компенсаційних стабілізаторах стабілізація досягається шляхом зворотного зв'язку з виходу стабілізатора на вхід регульованого елемента – потужний транзистор.

**Інвертори** – це пристрої, що реалізують процес перетворення постійного струму у змінний. Інвертори бувають залежні (здійснюється передача енергії з мережі постійного струму до мережі змінного) та автономні (робота без навантаження).

Схема однофазного автономного інвертора струму наведена в таблиці 9.1.

**Перетворювачі частоти** забезпечують перетворення змінного струму (напруги) однієї частоти у змінний струм іншої частоти. Розрізняють перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму та перетворювачі з безпосереднім зв'язком. Такі перетворювачі дозволяють регулювати вихідну частоту за допомогою системи керування інвертора в широкому діапазоні як вище, так і нижче за частоту мережі живлення. Переважна область використання – електроприводи змінного струму.

## 9.8 Електронні підсилювачі та генератори

**Підсилювачі** – це пристрої, які дозволяють підвищити потужність вхідного електричного сигналу за рахунок енергії джерела живлення підсилювача за допомогою підсилюючих елементів (транзисторів, операційних підсилювачів) при заданому рівні спотворень. Вони є одними з найбільш важливих пристроїв, що широко використовуються в системах передачі та обробки різної інформації, яка подається за допомогою електричних сигналів.

Таблиця 9.1 – Схеми пристроїв перетворювальної техніки

Назва пристрою	Схема пристрою
Однофазний однапівперіодний випрямляч з ємнісним фільтром	
Згладжувальні фільтри	
Стабілізатор постійної напруги	
Інвертор	



Висока чутливість, швидкодія, компактність, економічність електронних підсилювачів зумовили їх широке застосування у вимірювальній техніці, електро- і радіозв'язку, автоматиці, обчислювальній техніці. Залежно від призначення підсилювачі поділяються на: підсилювачі постійного струму; підсилювачі низької частоти; підсилювачі високої частоти; виборчі підсилювачі; широкосмугові, імпульсні та операційні.

Операційні підсилювачі належать до класу багатофункціональних, або універсальних, так як з їх допомогою можна реалізувати практично будь-який вид посилення електричного сигналу.

Найбільшого розповсюдження набули підсилювачі на базі напівпровідникових біполярних та польових транзисторів, а також у вигляді неподільних компонентів – підсилювальних інтегральних мікросхем. Найпростіша комірка, що дозволяє здійснити підсилення, має назву **підсилювальний каскад**.

**Електронний генератор** - це пристрій, що перетворює електричну енергію джерела постійного струму в енергію незникаючих електричних коливань визначеної форми, частоти і амплітуди.

У залежності від форми вихідної напруги генератори розподіляються на:

- генератори синусоїдних (гармонійних) коливань;
- генератори імпульсів прямокутної форми;
- генератори спеціальних сигналів.

## 9.9 Дискретні електронні пристрої

**Дискретні електронні пристрої** – це пристрої, які здійснюють прийом, обробку та передачу електричних сигналів, отриманих шляхом дискретизації (квантуванням) вихідної аналогової функції. Квантування може бути за часом, за рівнем, змішане (за часом і рівнем).

У цифрових пристроях інформація подається у вигляді напруги (струму) імпульсної форми. Напруга в цифровому пристрої має лише два значення: близьке до нуля вольт – умовно названо *логічним нулем*, і напругою у декілька вольт (близько до 5 В) – умовно названо *логічною одиницею*. Тому то пристрої,

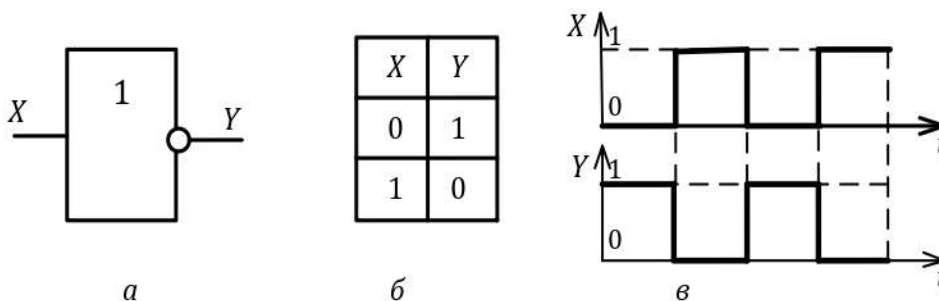
які призначені для обробки інформації у двійковій формі, мають назву **логічні елементи** (ЛЕ). Усі логічні пристрої можна розділити на дві групи :

- **комбінаційні пристрої**, у яких вихідні сигнали в цей момент однозначно визначаються вхідними сигналами;
- **послідовні**, у яких вихідні сигнали залежать не тільки від вхідних сигналів, але й від попереднього стану пристрою.

Для операцій над значеннями логічних змінних використовується спеціальна **алгебра логіки (Булева алгебра)**, де змінна може приймати тільки два значення: «0» або «1». **Логічна функція** – це залежність вихідних логічних змінних від вхідних, яка приймає значення «0» або «1». Будь-яку логічну функцію зручно представити у вигляді таблиці істинності, де записуються можливі комбінації аргументів і відповідні їм функції.

Основними логічними операціями є:

- логічне повторення - операція **ТАК**:  $y=x$ ; вихідна змінна  $Y$  повторює сигнал на вході  $X$ ;
- логічне заперечення (*інверсія*) – операція **НІ** – рисунок 9.28;

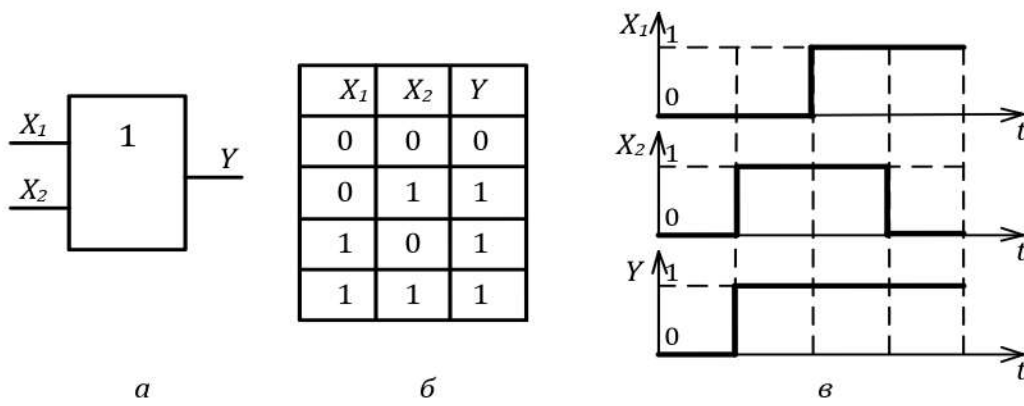


*a* – умовне графічне позначення; *б* - таблиця істинності; *в* - часові діаграми

Рисунок 9.28 – Логічний елемент **НІ**

Мнемонічне правило для елемента *НІ*: на виході буде «0», коли на вході схеми «1»; на виході буде «1», коли на вході схеми «0».

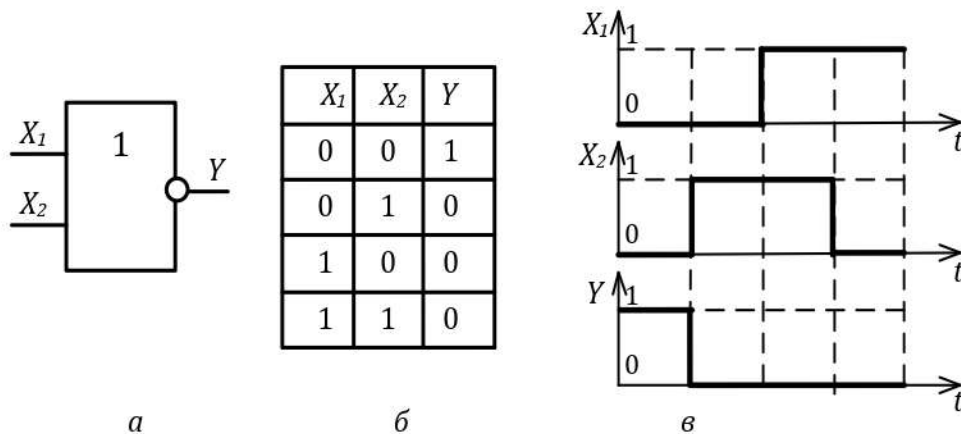
- логічне додавання **АБО** та **АБО-НІ** – рисунок 9.29 та рисунок 9.30 відповідно;



*a* - умовне графічне позначення; *б* - таблиця істинності; *в* - часові діаграми

Рисунок 9.29 – Логічний елемент АБО

Мнемонічне правило для елемента *АБО* з будь-якою кількістю входів: на виході буде «1» тоді й тільки тоді, коли хоча б на одному вході діє «1»; на виході буде «0» тоді й тільки тоді, коли на всіх входах діє «0».

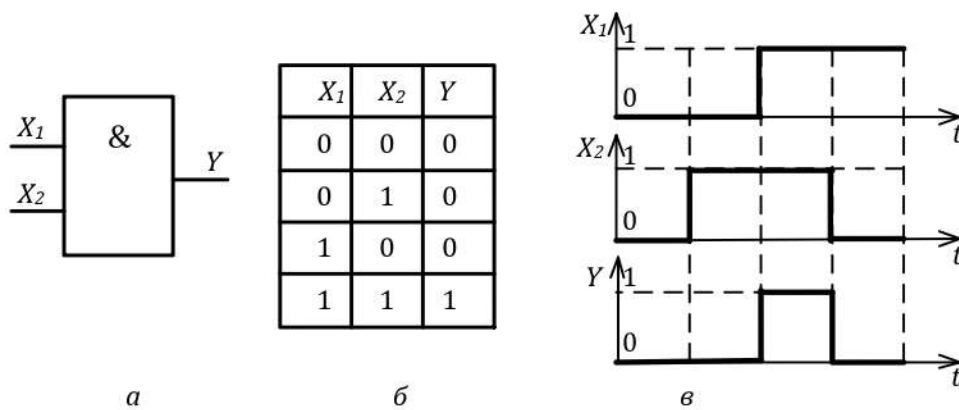


*a* - умовне графічне позначення; *б* - таблиця істинності; *в* - часові діаграми

Рисунок 9.30 – Логічний елемент АБО-НІ

Мнемонічне правило для елемента *АБО-НІ* з будь-якою кількістю входів: на виході буде «1» тоді й тільки тоді, коли на всіх входах діє «0»; на виході буде «0» тоді й тільки тоді, коли хоча б на одному вході діє «1».

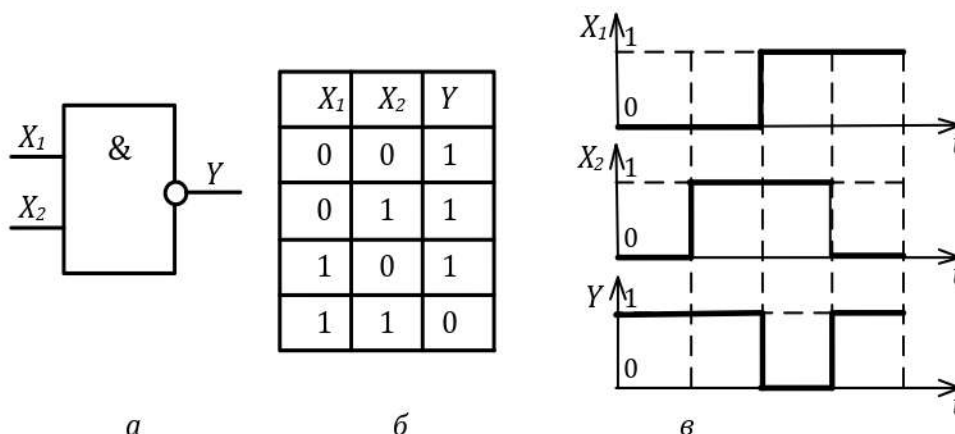
- логічне множення – операція **I** та операція **I-НІ** – рисунок 9.31 та рисунок 9.32 відповідно.



*a* - умовне графічне позначення; *б* - таблиця істинності; *в* - часові діаграми

Рисунок 9.31 – Логічний елемент І

Мнемонічне правило для елемента *I* з будь-якою кількістю входів: на виході буде «1» тоді й тільки тоді, коли на всіх входах діє «1»; на виході буде «0» тоді й тільки тоді, коли хоча б на одному вході діє «0».

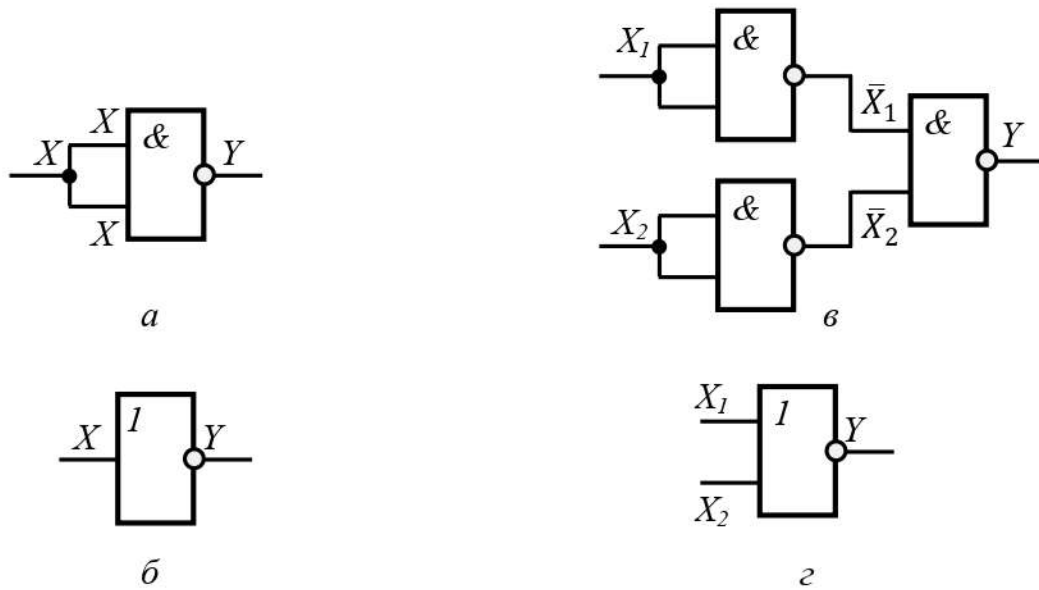


*a* - умовне графічне позначення; *б* - таблиця істинності; *в* - часові діаграми

Рисунок 9.32 – Логічний елемент І-ІІ

Мнемонічне правило для елемента *I-II* з будь-якою кількістю входів: на виході буде «1» тоді й тільки тоді, коли хоча б на одному вході діє «0»; виході буде «0» тоді й тільки тоді, коли на всіх входах діє «1».

На основі розглянутих типів логічних елементів можна реалізувати яку-завгодно логічну функцію. Наприклад, елемент *НИ* можна реалізувати з елемента *2I-НИ* шляхом поєднання входів – рисунок 9.33 (*a*, *б*), а операцію *2АБО* можна реалізувати на елементах *2I-НИ* – рисунок 9.33 (*в*, *г*).



*a* та *б* – елемент *НІ* з елемента *2І-НІ* шляхом поєднання входів;  
*в* та *г* – операція *2АБО*, що реалізована на елементах *2І-НІ*  
 Рисунок 9.33 – Реалізація операцій *НІ* та *АБО* на елементах *2І-НІ*

Пристрої, вихідні функції яких однозначно визначаються вхідними змінними, мають назву **комбінаційні**. Для побудови комбінаційних пристроїв використовують два типа базових логічних елемента – елемент АБО-НІ та елемент І-НІ. Логічні елементи широко застосовуються в автоматичній, обчислювальній техніці й цифрових вимірювальних приладах.

На рисунку 9.34 наведена схема комбінаційного пристрою з відомими значеннями вхідних змінних, при цьому для елемента *D1* реалізується операція *2АБО-НІ*, для елемента *D2* – операція *2І*, для елемента *D3* – операція *2АБО*.

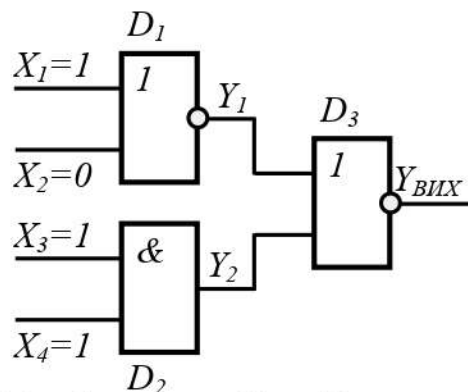


Рисунок 9.34 - Схема комбінаційного пристрою з відомими значеннями вхідних змінних

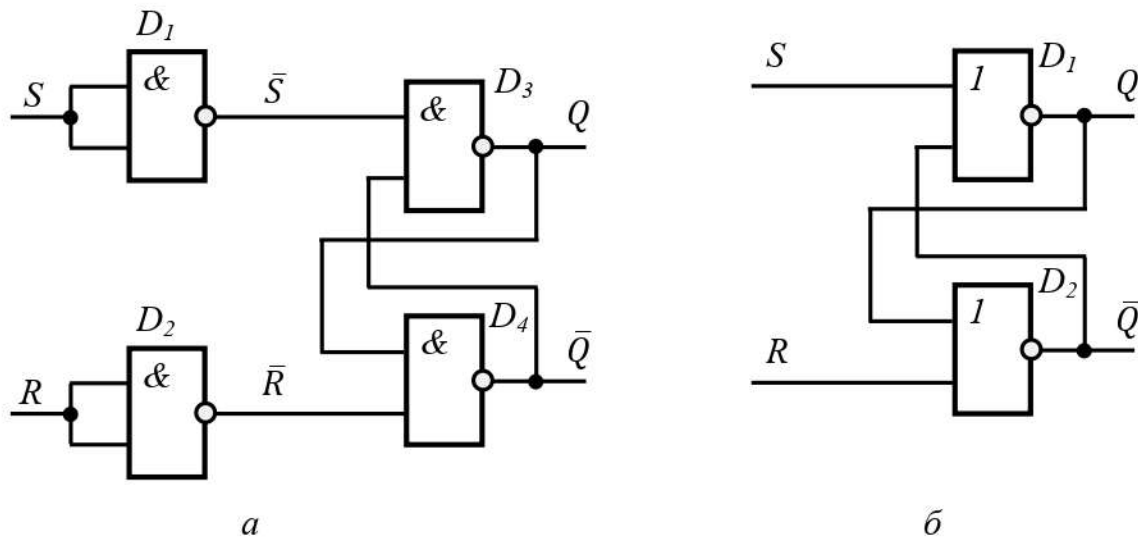
Згідно таблиць істинності для елементів  $D1$  та  $D2$  значення їх вихідних змінних дорівнюють:

- для елемента  $D1$ : на входах  $X_1 = 1, X_2 = 0$ , на виході  $Y_1 = 0$ ;
- елемента  $D2$ : на входах  $X_3 = 1, X_4 = 1$ , на виході  $Y_2 = 1$ .

Сигнали  $Y_1$  та  $Y_2$  одночасно є вхідними для елементами  $D3$ , тому за його таблицею істинності знайдемо  $Y_{вих} = 1$ .

До типових комбінаційних пристроїв, які найчастіше використовуються при створенні цифрових систем, належать: *тригер, дешифратор, мультиплексор, суматор, лічильник, регістри, цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворювачі.*

Розглянемо  $RS$ -тригер на елементах  $2I$ - $НІ$  та  $2АБО$ - $НІ$ , схеми якого наведені на рисунку 9.35.



$a$  – на елементі  $2I$ - $НІ$ ;  $b$  – на елементі  $2АБО$ - $НІ$

Рисунок 9.35 –  $RS$  – тригер на елементах

Це пристрій з двома стійкими станами, які він може міняти стрибком при надходженні сигналу керування, який виготовляють як на окремих елементах (транзисторах, діодах, резисторах, конденсаторах), так і методами інтегральної технології. Входи тригера умовно названі  $S$  (від англ. *SET* - встановлювати, вмикати) і вхід  $R$  (від англ. *RESET* – повернення, вимкнення), виводи позначаються  $Q$  та  $\bar{Q}$ . Завдяки зворотнім зв'язкам (вихід елемента  $D3$  підключений до

одного з входів елемента D4, і навпаки), схема має змогу тривалий час знаходитись в одному з стійких станів з  $S=R=0$ . Робота тригера аналогічна роботі вимикача: комбінація  $S = 1, R = 0$  – це стан «вмикання», на виході  $Q = 1$ ; комбінація  $S = 0, R=0$  – це стан зберігання попереднього стану; комбінація  $S = 0, R = 1$  – це стан «вимкнення», на виході  $Q = 0$ .

Тригери широко застосовують в електронних пристроях, в яких вони виконують функції перемикаючих, лічильних та запам'ятовуючих елементів. В цифровій техніці тригери використовуються в інтегральному виконанні на базі логічних елементів.

**Дешифратор** – це комбінаційно-логічний пристрій, який для кожної комбінації кодів на входах створює логічну «1» чи «0» лише на одному своєму виході. Використовується для вибору певної мікросхеми у мікропроцесорних пристроях та для перетворення двійкового коду у десятковий. Існують також дешифратори, які перетворюють певний вхідний код до певного вихідного коду та використовуються для керування індикаторами, що відображують знакову інформацію.

**Мультиплексор** - це комбінаційний пристрій, в якому вихід з'єднується з одним із декількох входів у відповідності до коду, поданого на його адресні входи. При цьому на вихід надходить сигнал з того входу, номер якого подано двійковим числом на адресних входах. Як і дешифратор, мультиплексор використовується в схемах відображення інформації і в складі обчислювальних систем.

**Суматор** – пристрій, що здійснює складання двох чисел, що наведені у двійковій формі, а також значення на спеціальному вході перенесення.

**Лічильники імпульсів** призначені для лічби кількості імпульсів, що поступають на їх вхід. Результат лічби записується в них в двійковому коді.

**Регістри** – це функціональні вузли, які призначені для збереження інформації, а в деяких випадках для її перетворення.



У цифрових пристроях, які керують технічними системами виникає необхідність перетворення аналогової величини в цифровий код, який подається на вхід цифрового пристрою. Для створення аналогових сигналів керування необхідне зворотне перетворення двійкових кодів цифрових пристроїв у аналоговий сигнал. Ці задачі розв'язуються за допомогою спеціальних пристроїв – **аналогово-цифрових** та **цифро-аналогових перетворювачів**, які конструктивно виконуються у вигляді інтегральних мікросхем.

### **9.10 Мікропроцесорна техніка: мікроконтролери, пристрої пам'яті, функціонування інтерфейсу**

Створені в процесі розвитку мікроелектроніки й обчислювальної техніки спеціалізовані програмовані великі інтегральні мікросхеми (ВІС) - мікропроцесори (МП) – спричинили якісний стрибок щодо створення контролюючих, керуючих і оброблюючих систем з мікро-ЕОМ, що безпосередньо вбудовуються в прилади, машини, технологічне обладнання та процеси. Масовий випуск порівняно недорогих мікропроцесорних наборів ВІС, проста перебудова і висока точність цифрових засобів обробки інформації дозволили створити високоефективні спеціалізовані мікро-ЕОМ для систем промислової автоматики, зв'язку, керування технологічними процесами. Випускається велика кількість типів мікро-ЕОМ з різноманітними функціональними можливостями і вартістю для застосувань, починаючи від окремих спеціалізованих приладів до систем автоматичного управління технологічними об'єктами. В багатьох випадках для керування простими технологічними об'єктами, побутовими приладами достатньо порівняно простої мікро-ЕОМ з невеликим обсягом пам'яті і спрощеними пристроями обміну інформацією з користувачем. Вони виробляються на одному кристалі у вигляді єдиної мікросхеми. Такі спеціалізовані мікро-ЕОМ мають мікроконтролери, що програмуються, або просто мікроконтролери (МК).

Структурна схема МП дає можливість наочно розглянути його роботу щодо виконання двох основних функцій, а саме, обробка та маніпулювання даними. Загальна структура 8-розрядного МП наведена на рисунку 9.36.



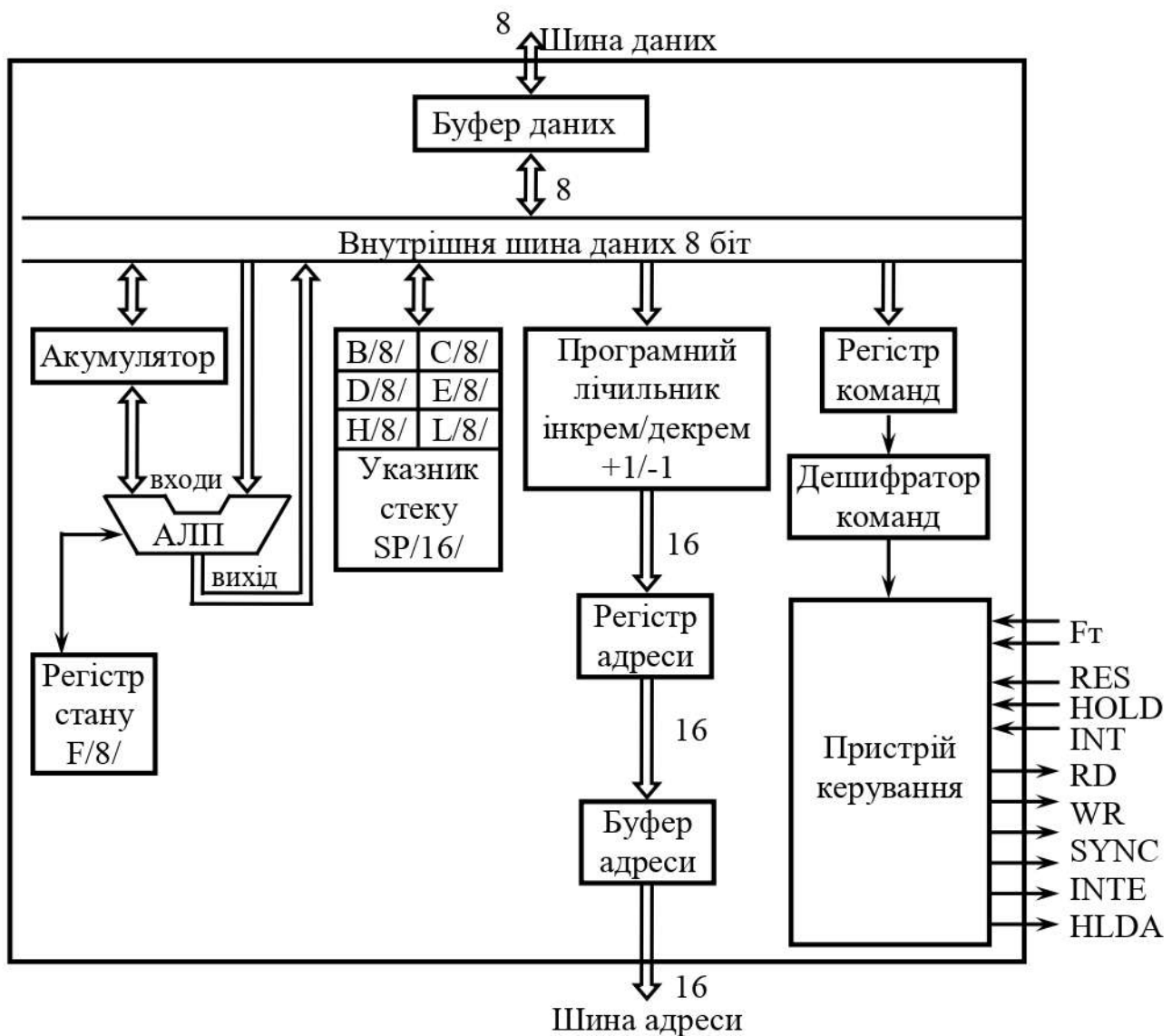


Рисунок 9.36 – Структурна схема 8-розрядного МП

Розглянемо кожен вузол та блок схеми більш детально.

**Арифметико-логічний пристрій (АЛП)** призначений для обробки даних та має два вхідні порти (позначені як «входи») і один вихідний порт – «вихід». Відзначимо, що *порт* – це схема, куди надходить ввідна або вивідна інформація. Два вхідних порти дозволяють АЛП приймати дані з внутрішньої шини даних МП і зі спеціального регістра, який має назву **аккумулятор** (робочий регістр). Вихідний порт надає АЛП можливість пересилати «слово» даних в аккумулятор або на шину даних.

**Регістри МП** призначені для тимчасового зберігання одного слова даних і на відзнаку від комірок зовнішньої пам'яті вибираються конкретною коман-

дою. Окремі регістри мають спеціальне призначення (РСП), а інші – багатоцільове і мають назву регістри загального призначення (РЗП) і можуть використовуватись програмістом на його розсуд. Кількість і призначення регістрів конкретного МП залежить від його архітектури.

**Акумулятор (робочий регістр)** – це основний регістр МП, який застосовується при різноманітних маніпуляціях з даними та має 8 розрядів. Будь-яка з операцій над двома словами даних передбачає розміщення одного з них в акумуляторі, а іншого в пам'яті або ще в якому-небудь регістрі. Результат операції АЛП теж звичайно міститься в акумуляторі.

**Регістри загального призначення (РЗП)** – це 8-розрядні регістри, що надані у розпорядження користувача. МП, який має декілька РЗП, а саме, В, С, D, Е, Н, L. При цьому регістри В і С, D і Е, Н і L можуть об'єднуватися та створювати логічні пари ВС, DE, HL.

**16-розрядний регістр SP (указник стеку)** призначений для організації спеціальних звернень МП до пам'яті. 16-розрядний лічильник команд (програмний лічильник) – це один з найбільш важливих регістрів МП, який призначений для відстеження послідовності виконання команд. Кількість розрядів лічильник команд 16, що надає можливість звернення на будь-яку адресу від 0 до 65535, де може знаходитись інформація про той чи інший крок програми.

При кожному зверненні до пам'яті **16-розрядний регістр адреси** містить двійкове число, що вказує конкретну комірку пам'яті, що підлягає використанню МП. Вихід такого регістру має *буфер адреси* і утворює *шину адреси* (ША).

**Регістр стану (ознак)** – це спеціальний регістр, окремі біти якого встановлюються від 0 до 1в залежності від результату дій, що виконує АЛП. Найбільш важливими є біти:, а саме, ознаки нуля (ознака Z) і ознаки переносу (ознака C).

**Регістр команд** – це спеціальний восьми розрядний регістр, в якому розміщується код поточної команди, який надходить з чергової комірки пам'яті. Ця функція реалізується МП автоматично з початком циклу вибірки-виконання, який має назву *машинний цикл*.

**Дешифратор команд** – це логічна схема, що розпізнає двійковий код команди і формує відповідні сигнали для пристрою керування.

**Пристрій керування** – це цифровий логічний автомат, що формує сигнали керування внутрішніми вузлами МП, а також зовнішніми пристроями за сигналами від дешифратора команд і внутрішніх вузлів мікро-ЕОМ. Пристрій керування має декілька входів і виходів, сигнали на яких утворюють шину керування мікро-ЕОМ. Основні сигнали, які утворюють шину керування мікро-ЕОМ, наведені в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2 – Основні сигнали, на яких утворюють шину керування

Найменування сигналу	Призначення
<i>Fm</i> - вхід тактових синхроімпульсів	синхронізація роботи внутрішніх вузлів МП від зовнішнього генератора
<i>RES</i> – вхід «скидання»	при поданні імпульсу на цей вхід всі вузли МП встановлюються у вихідний стан, починається виконання програми з читання команди, яка записана в комірку пам'яті з адресою 0000H
<i>RD, WR</i> – виходи «читання» і «запис» відповідно	подачею імпульсів на ці виходи, що підключені до однойменних входів відповідних комірок пам'яті або зовнішніх приладів, МП ініціює їх для відповідного обміну інформацією
<i>INT</i> – вхід (запит) та <i>INTE</i> – вихід (підтвердження) переривання	наявність таких сигналів дозволяє апаратним, а не програмним засобам змінити порядок виконання програми
<i>HOLD</i> – вхід (запит) та <i>HLDA</i> - вихід (підтвердження) звільнення шин	такі сигнали дозволяють при необхідності відключити МП від шин мікро-ЕОМ

**Внутрішня шина даних** має 8 розрядів і з'єднує між собою АЛП і регістри, при цьому здійснюються передача даних всередині МП. Кожний блок МП завжди підключений до внутрішньої шини даних, однак скористуватися нею

можно тільки після отримання відповідного сигналу від схем керування. Всі функціональні вузли МП мають двосторонній зв'язок з внутрішньою шиною даних, тобто вони можуть і посилати дані на шину, і приймати з неї дані. Внутрішня шина – це лінія двостороннього зв'язку, яка має буфер для підключення зовнішніх пристроїв.

**Буфери, як підсилювачі сигналів шин.** Ці вузли підсилюють сигнали з шин, здійснюють за сигналами від пристрою керування вибір напрямку передавання інформації або перемикають виходи шин МП в Z-стан.

У відповідності з розглянутою структурою цикл виконання команди МП здійснюється таким чином:

- а) після скидання МП встановлює на шині адреси адрес 0000H і за сигналом *RD* зчитує з цієї комірки її вміст, а код команд (копія) розміщується на внутрішній шині даних;
- б) цей код по шині даних заноситься в реєстр команд і на цьому завершується підцикл вибірки команди;
- в) після цього починається підцикл виконання команди, під час якого вміст реєстру команд за допомогою дешифратора команд і пристрою керування перетворюється в послідовність дій, що здійснюються внутрішніми вузлами МП з виконання заданої команди. При цьому МП може зчитувати і записувати дані в пам'ять і зовнішні пристрої, здійснювати арифметичні і логічні операції;
- г) після виконання команди зміст лічильника – реєстра адреси автоматично збільшується на одиницю, МП зчитує зміст пам'яті за цією новою адресою, це повинен бути код наступної команди), і далі процеси протікають аналогічно тому, що розглянуте в пунктах а та б.

МП може функціонувати тільки спільно з іншими складовими частинами системи, тому то розглядати МП окремо від них не можна. Структурна схема мікропроцесорної системи (МПС) наведена на рисунку 9.37. Система містить елементи, що стосуються технологічного об'єкту (ТО), а саме, виконавчі пристрої, керування якими здійснюється відповідними електричними апаратами, пристрій сполуки (ПС), давачі параметрів ТО та АЦП. ПС здійснює підсилення

сигналів керування до необхідного рівня, АЦП – для перетворення сигналів з виходу давачів у цифровий вигляд.

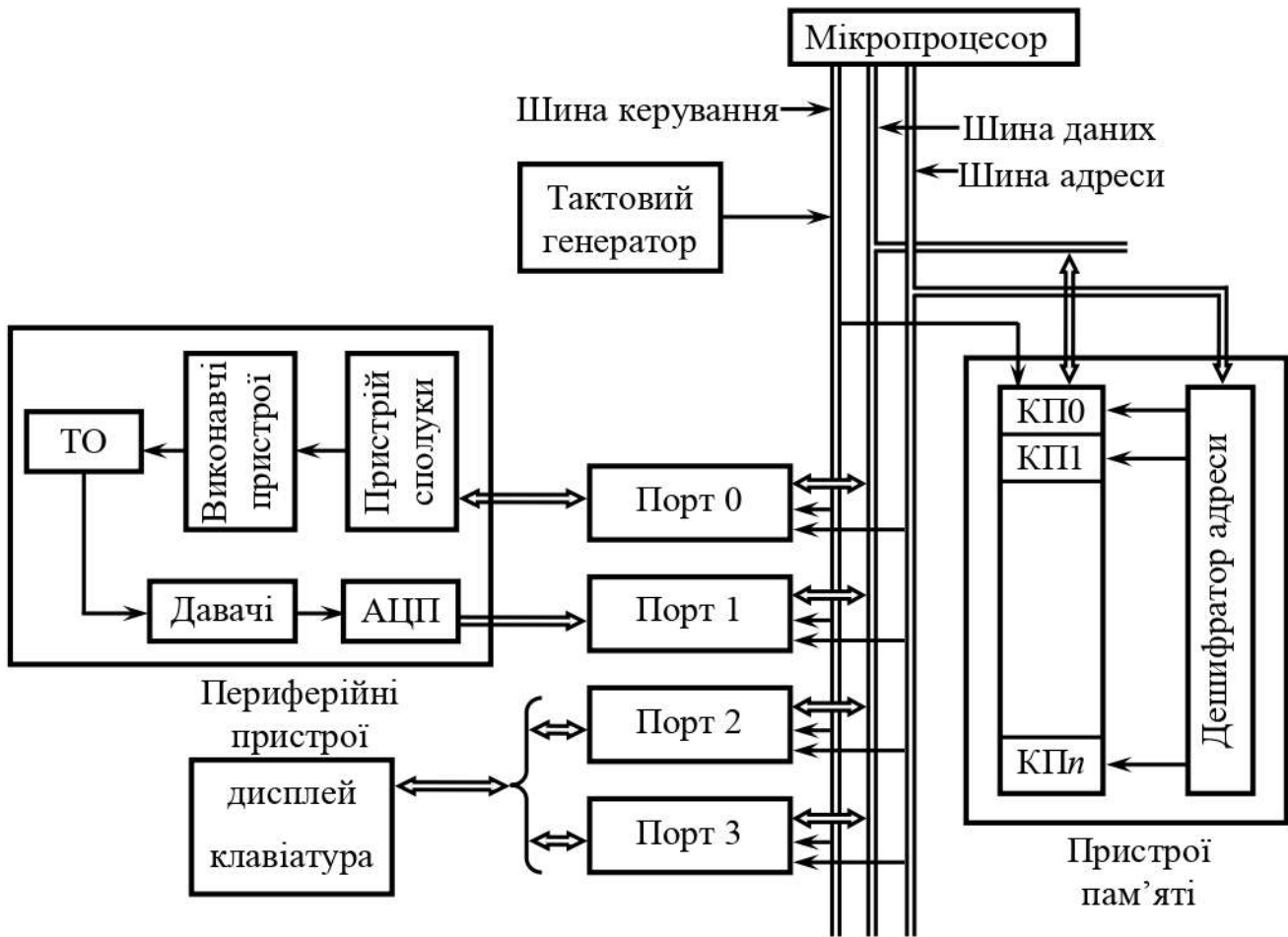


Рисунок 9.37 – Структурна схема мікропроцесорної системи

Для діалогу користувача з МП використовуються зовнішні периферійні прилади – дисплей та клавіатура. Для функціонування системи необхідні тактовий генератор, що забезпечує синхронізацію роботи системи у часі, пристрої пам'яті, пристрій вводу-виводу.

Розглянемо пристрої пам'яті (ПП) більш детально. ПП містять постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) і оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП). В ПЗП записується програма ініціалізації мікропроцесорної системи, що виконується автоматично при вмиканні і забезпечує діалог з користувачем та роботу пристроїв вводу-виводу інформації. Інформація в ПЗП зберігається постійно і незалежно від того, ввімкнений прилад чи ні – її можна лише зчитувати.

ОЗП призначений для зберігання програм і даних користувача, а також проміжних результатів обчислень, інформація в ОЗП може записуватися і зчитуватися. При вимкненні живлення інформація в ОЗП втрачається. Пам'ять звичайно з'єднана з МП трьома шинами: шиною адреси, шиною даних та шиною керування. Кожне слово у МП розміщується в окремій комірці пам'яті (КП), яка має свій індивідуальний номер адреси. Адреса (двійкове число) з'являється на шині адреси і перетворюється дешифратором адреси у сигнал, що ініціює відповідну КП до обміну даними з МП згідно сигналам «Читання пам'яті» або «Запис в пам'ять» на шині керування. Ці сигнали інформують МП про необхідність подавання даних на відповідну шину або отримання даних з шини для запису у вибрану область пам'яті.

Пристрої вводу-виводу МПС містять порти вводу-виводу з певними номерами 0; 1; 2; 3. В схемі (див. рисунок 9.37) порти 0 та 1 використовуються для передавання сигналів керування ТО і інформації про його стан. Порти 2 та 3 – відповідно для обміну даними з периферійними пристроями. Кожен порт є з'єднаним з шиною адреси і керування.

У відповідності до розглянутої структури МПС працює таким чином: згідно з програмою, що записана в пристроях пам'яті, мікропроцесор здійснює операції над даними, забезпечує обмін інформацією між своїми внутрішніми вузлами, пристроєм пам'яті і зовнішніми об'єктами, використовуючи пристрої вводу-виводу. Інформація пересилається по шині даних, причому мікропроцесор заздалегідь встановлює на шині адреси адресу комірки пам'яті або зовнішнього пристрою, з яким в даний момент часу здійснюється обмін, ініціюючи процес обміну сигналами «читання» або «запис», що пересилається по шині керування.

### **Контрольні запитання до теми 9**

1. Що таке електроніка? Які існують види електроніки?
2. Що таке напівпровідникові прилади?
3. Поясніть означення «власна провідність», «домішкова провідність», «акцептори».



4. Які напівпровідники є напівпровідниками  $n$ -типу, а які  $p$ -типу?
5. Охарактеризуйте напівпровідникові резистори та наведіть їх графічні позначення на схемах електричних принципівих.
6. Охарактеризуйте напівпровідникові діоди та наведіть їх графічні позначення на схемах електричних принципівих.
7. Який електронний пристрій є біполярним транзистором? Опишіть його будову.
8. Що таке емітер, база та колектор у біполярному транзисторі?
9. Який електронний пристрій є польовим транзистором? Опишіть його будову.
10. Що таке сток та затвор у польовому транзисторі?
11. Який електронний пристрій є тиристором? Опишіть його будову.
12. Які електронні прилади належать до класу тиристорів?
13. Що таке оптоелектроніка?
14. Які електронні прилади та пристрої належать до фотоелектричних пристроїв?
15. Наведіть графічні позначення фотоелектричних пристроїв на схемах електричних принципівих.
16. Що таке випрямляч? Наведіть схеми випрямлячів та опишіть їх принцип дії.
17. Які електронні пристрої належать до перетворювальної техніки?
18. Що таке інтегральна мікросхема та силові напівпровідникові модулі?
19. Які електронні пристрої належать до дискретних електронних пристроїв?
20. Які існують основні логічні операції в алгебрі логіки? Назвіть найрозповсюджені логічні операції.
21. Розкрийте суть мнемонічних правил для логічних операцій « $НИ$ », « $АБО$ », « $АБО-НИ$ », « $I$ » та « $I-НИ$ ».
22. Що таке мікроконтролер та мікропроцесор? З яких частин складається мікропроцесор?
23. Яке призначення арифметико-логічного пристрою, регістрів, пристрою керування, шин?
24. Яка електронна система є мікропроцесорною? Що входить до її складу?

## Список літератури для вивчення теми 9

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / В.І.Мілих, О.О.Шавьолкін. За ред. В.І.Мілих. – К.: Каравелла, 2007. – 688 с.
2. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: Навчальний посібник / С.О. Квітка, В.Ф. Яковлев, О.В. Нікітіна; за ред. В.Ф. Яковлева. – Суми: Сумський національний аграрний університет, 2012. – 285 с.
3. Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. За ред. А.Г.Соскова. / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г.Сосков. – К: Каравела, 2003. – 368 с.
4. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / Будіщев М.С. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
5. Паначевний Б.І. Загальна електротехніка: теорія і практикум / Б.І. Паначевний, Ю.Ф. Свєргун. – Київ: Каравела, 2003. – 440 с.
6. Овчаров В.В. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / В.В.Овчаров, О.Ю.Вовк. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.